

SÉRIE A, N° 1252

N° D'ORDRE :

2121

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES NATURELLES

PAR

Louis-Auguste PELOUS ✱, ✶, ☉ I.

AGRÈGÉ DES SCIENCES NATURELLES

PROFESSEUR AU LYCÉE DE NANTES

PROFESSEUR SUPPLÉANT A L'ÉCOLE DE PLEIN EXERCICE DE MÉDECINE ET PHARMACIE DE NANTES

1^{re} THÈSE. — ÉTUDE DE L'ACTION DES COURANTS ÉLECTRIQUES ALTERNATIFS SUR LES PHÉNOMÈNES D'OSMOSE ET LA CIRCULATION DE L'EAU CHEZ LES PLANTES VASCULAIRES.

2^e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le 28 Juin 1930 devant la Commission d'examen.

Président : M. MOLLIARD

Examineurs { MM. CH. PEREZ
LÉON BERTRAND

PARIS

LIBRAIRIE GÉNÉRALE DE L'ENSEIGNEMENT

4 RUE DANTE 4

—
1930

SÉRIE A, N° 1252

N° D'ORDRE :

2121

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES NATURELLES

PAR

Louis-Auguste PELOUS ✱, ✶, ☉ I.

AGRÉGÉ DES SCIENCES NATURELLES

PROFESSEUR AU LYCÉE DE NANTES

PROFESSEUR SUPPLÉANT A L'ÉCOLE DE PLEIN EXERCICE DE MÉDECINE ET PHARMACIE DE NANTES

1^{re} THÈSE. — ÉTUDE DE L'ACTION DES COURANTS ÉLECTRIQUES ALTERNATIFS SUR LES PHÉNOMÈNES D'OSMOSE ET LA CIRCULATION DE L'EAU CHEZ LES PLANTES VASCULAIRES.

2^e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le

1930 devant la Commission d'examen.

Président : M. MOLLIARD

Examineurs { MM. CH. PEREZ
LÉON BERTRAND

PARIS

LIBRAIRIE GÉNÉRALE DE L'ENSEIGNEMENT

4 RUE DANTE 4

—
1930

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

MM.

Doyen..... C. MAURAIN, *Professeur*, Physique du globe.

Doyens honoraires.. P. APPELL, M. MOLLIARD.

<i>Profess. honoraires</i> ..	A. JOANNIS.	A. FERNBACH.
	H. LE CHATELIER.	A. LEDUC.
	H. LEBESGUE.	E. HEROUARD.



Professeurs

ÉMILE PICARD.....	Analyse supér. et algèbre supérieure.
G. KOENIGS.....	Mécanique physique et expérimentale.
E. GOURSAT.....	Calcul différentiel et calcul intégral.
P. JANET.....	Electrotechnique générale.
F. WALLERANT...	Minéralogie.
P. PAINLEVÉ.....	Mécanique anal. et mécanique céleste
GABRIEL BERTRAND	Chimie biologique.
M ^{me} P. CURIE.....	Physique générale et radioactivité.
M. CAULLERY.....	Zoologie (Evolution des êtres organisés)
G. URBAIN.....	Chimie générale.
ÉMILE BOREL.....	Calcul des probabilités et phys. mathém
L. MARCHIS.....	Aviation.
JEAN PERRIN.....	Chimie physique.
RÉMY PERRIER....	Zoologie (Enseignement P. C. N.).
H. ABRAHAM.....	Physique.
M. MOLLIARD.....	Physiologie végétale.
E. CARTAN.....	Géométrie supérieure.
L. LAPICQUE.....	Physiologie générale.
E. VESSIOT.....	Théorie des fonct. et th. des transf.
A. COTTON.....	Physique générale.
J. DRACH.....	Application de l'analyse à la géométrie.
CHARLES FABRY...	Physique.
CHARLES PÉREZ...	Zoologie.
LÉON BERTRAND...	Géolog. structurale et géolog. appliquée.
R. LESPIEAU.....	Théories chimiques.
E. RABAUD.....	Biologie expérimentale.
P. PORTIER.....	Physiologie comparée.
E. BLAISE.....	Chimie organique.
P.-A. DANGEARD..	Botanique.
P. MONTEL.....	Mécanique rationnelle.
P. WINTREBERT...	Anatomie et histologie comparées
O. DUBOSCQ.....	Biologie maritime.
G. JULIA.....	Mathématiques générales.
A. MAILHE.....	Etude des combustibles.
L. LUTAUD.....	Géogr. physique et géol. dynamique.
EUGÈNE BLOCH...	Physique théorique et phys. céleste.
HENRI VILLAT....	Mécanique des fluides et applications.
CH. JACOB.....	Géologie.
P. PASCAL.....	Chimie minérale
LÉON BRILLOUIN..	Théories physiques.
V. AUGER.....	Chimie appliquée.
E. ESCLANGON....	Astronomie.

E. PÉCHARD....	Chimie (Ens. P. C. N.).	L. JOLEAUD.....	Paléontologie.
M. GUICHARD...	Chimie minérale.	M. JAVILLIER....	Chimie biologique.
A. GUILLET....	Physique.	A. DUFOUR.....	Physique (P.C.N.).
A. MAUGUIN....	Minéralogie.	F. PICARD.....	Zoologie (Evolution
L. BLARINGHEM	Botanique		des êtres organisés).
A. MICHEL-LÉVY	Pétrographie.	ROBERT-LÉVY...	Zoologie.
G. DERREIMS...	Géologie.	L. DUNOYER....	Optique appliquée.
A. DENJOY.....	Calcul diff. et int.	A. GUILLIERMOND	Botanique (P.C.N.).
H. BENARD.....	Physique (P.C.N.).	A. DEBIERNE....	Radioactivité.
E. DARMOIS....	Physique.	M. FRECHET....	Calcul des probabilités
G. BRUHAT.....	Physique.		et phys. mathém.
H. MOUTON....	Chimie physique.		

Secrétaire..... A. PACAUD

ÉTUDE DE L'ACTION
DES COURANTS ÉLECTRIQUES ALTERNATIFS
SUR LES PHÉNOMÈNES D'OSMOSE
ET LA CIRCULATION DE L'EAU
CHEZ LES PLANTES VASCULAIRES



Digitized by the Internet Archive
in 2026

INTRODUCTION

Ce travail est l'exposé de recherches relatives à l'influence de l'électricité sur les phénomènes osmotiques en physiologie et sur la circulation de l'eau chez les plantes vasculaires. Il se rattache d'ailleurs directement à la série déjà longue des travaux relatifs à l'utilisation pratique de l'électricité en agriculture. Aussi me semble-t-il nécessaire de résumer brièvement les résultats déjà connus, bien que d'excellentes mises au point de ce sujet aient été publiées antérieurement dans diverses revues techniques ou générales.

Depuis l'électrovégétomètre de BERTHOLON DE SAINT-LAZARE (1783), de nombreux dispositifs ont été préconisés pour l'électrisation des végétaux. Certains auteurs se contentent d'utiliser l'électricité atmosphérique, d'autres emploient l'électricité produite artificiellement, d'autres enfin combinent les deux systèmes.

Laissant de côté les cas où l'électricité n'est employée que comme source de lumière, on peut classer en trois groupes les dispositifs employés par les différents expérimentateurs.

Le premier groupe comprend les appareils destinés à capter l'électricité atmosphérique. Leur construction ne diffère d'ailleurs que par des détails de peu d'importance. Ils sont toujours formés d'un paratonnerre plus ou moins élevé, mis à la terre par sa partie inférieure, parfois au moyen d'un réseau métallique enfoncé à une faible profondeur. Il est à remarquer que les différents auteurs recommandent d'éviter tout contact direct des végétaux soumis à l'expérience avec les parties métalliques de l'appareil, mais l'électricité atmosphérique qui s'écoule dans le sol produit de faibles courants telluriques qui rayonnent, du pied du mât, vers les points de potentiel différent, en sorte que les racines se trouvent placées dans un

champ électrique, d'intensité variable, mais toujours très faible.

Le deuxième groupe de systèmes comprend les appareils qui utilisent des courants continus. Ils sont constitués par un récipient isolant contenant les végétaux soumis à l'expérience, qui sont plantés en terre ou cultivés sur liquide nutritif. Dans ce récipient plongent deux électrodes reliées aux pôles d'une pile et disposées de telle façon que la culture se trouve placée entre elles. Dans quelques cas les expériences étaient faites en pleine terre où aboutissaient les électrodes. Parmi les nombreux auteurs qui ont ainsi étudié l'action des courants continus citons SHEPPARD (1846), PILSOUDSKY (1873), Armand GAUTIER (1882), STONE (1899), PLOWMAN (1902), MICHEELS et DE HEEN (1903), LAZERGES (1908), KÖVESSI (1912).

Un de ces procédés un peu particuliers et relativement simples est celui de PILSOUDSKY. Cet auteur employait des couples terreux, sortes d'éléments de pile constitués par deux lames métalliques, l'une de zinc, l'autre de fer, enfoncées dans le sol à une certaine distance l'une de l'autre et réunies par un conducteur aérien. Le courant qui s'établit dans le conducteur se ferme ensuite par le sol dans lequel sont cultivées les plantes soumises à l'expérience.

HÄGGLUND, en 1915, a employé le même dispositif que les auteurs précédents pour étudier l'action des courants alternatifs. Il opérait sur des levures qui se trouvaient ainsi placées dans le champ d'un courant à 48 périodes : sous une différence de potentiel de 50 volts, le courant qui passait dans la cuve avait une intensité de 0 amp. 005. SPECHNEW (1889) et KINNEY (1897) ont opéré de même sur des plantes supérieures avec des courants alternatifs de haute tension.

Enfin les systèmes du 3^e groupe utilisent sous forme de décharge lente l'électricité à haute tension obtenue soit par des transformateurs, soit par des machines à influence. En général ces appareils comprennent un réseau conducteur isolé, placé à une certaine hauteur, et muni de nombreuses pointes dirigées vers le sol pour faciliter l'écoulement de l'électricité en décharges lentes et invisibles. C'est le dispositif fondamental des expériences de BERTHELOT, LEMSTRÖM, LODGE et NEWMANN, BRESLAUER, BASTY, PRIESTLEY et plus récemment HEIM (1920).

En somme le caractère commun de ces divers procédés, c'est que les végétaux se trouvent placés, en partie ou en totalité, dans un champ électrique qui donne naissance à des courants de faible intensité.

Effets obtenus. — D'après la plupart des auteurs l'électrification, quel que soit le procédé employé, semble exercer une action très favorable sur la végétation. La vitesse de la germination et de la croissance, le développement final, le rendement des cultures, sont dans la majorité des cas supérieurs, chez les plantes ainsi traitées, à ceux des plantes témoins, et on peut être surpris, étant donné le fait que ces résultats sont pour la plupart connus depuis longtemps, que les procédés d'électroculture ne se soient pas rapidement généralisés. Il faut signaler cependant d'importantes divergences d'opinions. Par exemple, l'emploi des courants continus avait donné des résultats très favorables dans les expériences de PILSOUDSKY et d'Armand GAUTIER. KÖVESSI au contraire signale l'influence nuisible de ces courants qui retardent la germination et peuvent même l'empêcher absolument. Par l'emploi de courants à potentiel assez élevé (110 volts) il observe que les graines subissent une sorte d'épuisement électrolytique et que la membrane cellulaire devient perméable au point de permettre l'exosmose des substances albuminoïdes.

Les observations de LAZERGES concilient ces opinions contradictoires en montrant l'existence d'un optimum correspondant à une intensité de courant de 0 amp. 0005 pour la germination de l'orge.

Il est probable que les couples terreux de PILSOUDSKY et les piles thermo-électriques d'Armand GAUTIER produisaient un courant dont l'intensité était voisine de l'optimum ou ne dépassait pas toutefois le maximum que LAZERGES a déterminé pour l'orge au voisinage de 0 amp. 0007, tandis que les courants plus intenses employés par KÖVESSI devaient dépasser de beaucoup ce maximum.

L'emploi de l'électricité atmosphérique ou des décharges lentes semble grouper en sa faveur l'unanimité des observateurs. Remarquons que ces procédés mettent en jeu des courants d'une intensité toujours très faible. Dans le cas de l'élec-

trisation par réseau aérien, les particules chargées qui s'échappent des pointes métalliques viennent se décharger sur les plantes elles-mêmes qui sont alors parcourues, du sommet aux racines, par un très faible courant. De même, l'électricité prise à l'atmosphère est toujours en quantité très petite, sauf par temps orageux, où justement certains auteurs, entre autres BASTY, recommandent de dériver le courant sur une prise de terre, au moyen d'un interrupteur. Cependant quelques expérimentateurs signalent des circonstances où l'électrification peut devenir nuisible.

LEMSTRÖM recommande de l'interrompre lorsque le temps est trop chaud ; PRIESTLEY en déconseille également l'emploi lorsque le terrain est trop sec. D'après LEMSTRÖM, les résultats sont surtout appréciables dans les terres de bonne qualité suffisamment humides ; il conseille en outre de borner l'électrification à une durée de quelques heures par jour ; PRIESTLEY précise : au lever et au coucher du soleil. Cette observation est à rapprocher de celle de STONE sur l'action des courants continus : pour certaines intensités l'action du courant pendant un temps très court (une minute au moins) est suffisante pour agir comme stimulus.

Quelle est exactement la nature de l'influence ainsi exercée sur les végétaux par l'électricité. On a proposé plusieurs explications dont chacun renferme sans doute une part de vérité.

On a d'abord invoqué la production d'ozone. Ce gaz, d'après ESCARD, posséderait une action marquée qui se traduit par une accélération de la croissance. Mais cette explication ne peut valoir, que pour le cas des décharges lentes ou d'effluvation et ne s'applique pas au cas des courants continus. Il en est de même pour la deuxième explication, qui est celle de BERTHELOT, et qui invoque la formation de composés oxygénés de l'azote ; lesquels, neutralisés par les bases du sol, donneraient lieu à la formation de nitrates. En somme ces explications font intervenir l'énergie électrique comme agent de réactions chimiques. C'est également ce point de vue que défendent MICHEELS et DE HEEN pour le cas des courants continus, lorsqu'ils attribuent surtout l'action de ce courant à la formation d'une solution

colloïdale du métal des électrodes. Au contraire, dans le même cas, STONE considère le courant comme un stimulant et PLOWMAN, développant cette idée, étudie l'action différente des charges positives et négatives, négligeant, peut-être à tort, l'action chimique des ions qui les portent. Quant à la nature de cette stimulation, elle est totalement inconnue. LAZERGES fait remarquer que, dans certaines de ses expériences, l'action chimique des ions peut l'emporter sur l'action stimulante de leurs charges ; ainsi que LÖEB l'avait déjà dit à un point de vue différent.

Une autre action possible des courants de quelque intensité est simplement une action calorifique. P. LESAGE a montré que le développement rapide d'une culture de *Penicillium* dans un champ électro-magnétique de haute fréquence, n'est dû qu'à une élévation de température produite par des courants de FOUCAULT qui prennent naissance dans le milieu de culture. C'est ce qu'il appelle une action indirecte de l'électricité.

Une explication très intéressante a été donnée par GUARINI. Pour cet auteur l'énergie électrique est capable de remplacer l'énergie lumineuse nécessaire aux plantes à chlorophylle. C'est ainsi qu'il a fait développer, dans l'obscurité complète, des plantes vertes qu'il a conduites jusqu'à la production des fruits. LEMSTRÖM attribue de même aux phénomènes d'électricité atmosphérique le développement rapide des végétaux des régions polaires qui ne reçoivent, malgré l'absence de nuits pendant trois ou quatre mois de l'année, qu'une quantité totale de lumière et de chaleur solaires bien inférieure à celle que reçoivent les plantes des latitudes plus basses, dont le développement est cependant plus difficile.

LAURENT explique cette action par l'apport plus abondant d'aliments minéraux. Il a montré en effet que la fonction chlorophyllienne ne se maintient en pleine activité que si la plante reçoit en quantité suffisante des composés de l'azote, du soufre, du phosphore et du potassium.

Or cette nutrition minérale dépend des échanges osmotiques. Dans quelle mesure ces derniers peuvent-ils être modifiés par les actions électriques ? C'est là l'objet des recherches que je vais exposer et que j'ai limitées à l'étude de l'influence des courants alternatifs de haute tension.

PREMIÈRE PARTIE

ÉTUDE GÉNÉRALE DE L'INFLUENCE

DES COURANTS ALTERNATIFS

SUR LES PHÉNOMÈNES D'OSMOSE

La connaissance des phénomènes osmotiques est une des découvertes les plus intéressantes pour la physiologie. Cette notion est aujourd'hui classique, et je ne reviendrai pas sur l'historique de sa découverte non plus que sur les remarquables travaux de PFEFFER, TRAUBE, VAN T' HOFF et ARRBÉNIUS qui sont connus de tout le monde. Mais il me semble que le terme d'osmose a été détourné quelque peu de son sens initial dans l'usage courant. Etymologiquement il signifie « impulsion » et dans l'esprit de DUTROCHET qui le créa, il s'appliquait au phénomène de pénétration de l'eau dans l'osmomètre, ce qu'on appelle aujourd'hui le courant d'endosmose. Je crois qu'il vaut mieux lui conserver ce sens étroit et conserver le mot de diffusion pour désigner le passage des molécules dissoutes à travers la membrane perméable.

La découverte par TRAUBE des membranes hémiperméables, réalisées pratiquement par PFEFFER, a permis d'ailleurs d'étudier le phénomène plus commodément en supprimant presque complètement la diffusion. Cependant il ne faut pas oublier que l'hémiperméabilité absolue n'existe pas et que les plus parfaites de ces membranes ne sont hémiperméables que pour des solutions de corps dont les molécules sont assez grosses,

par exemple le saccharose, et encore lorsque ces solutions sont suffisamment diluées.

C'est donc avec de telles membranes qu'il faut opérer lorsqu'on se propose d'étudier les phénomènes osmotiques.

Contrairement à une opinion répandue et dont la responsabilité incombe à PFEFFER lui-même, cette préparation ne présente aucune difficulté si on prend les précautions nécessaires. Voici le procédé que j'ai employé et qui m'a réussi cinq fois sur six.

On prend un petit vase de pile en porcelaine poreuse, on le lave à la potasse bouillante, puis à l'eau régale. On le sèche ensuite à l'étuve. Lorsqu'il est bien sec on garnit ses bords de gutta-percha fondue et on lute un tube de verre d'un diamètre légèrement inférieur, de manière qu'il pénètre de 1 à 2 centimètres dans le vase. On laisse bien refroidir la gutta. Puis on plonge le vase dans l'eau distillée en faisant le vide dans l'intérieur au moyen d'une trompe à eau. L'air contenu dans les pores se dégage ainsi ; il est remplacé par l'eau distillée et le vase s'emplit peu à peu. On est ainsi assuré qu'il ne restera dans les pores aucune bulle d'air comprise entre deux index liquides. Il n'y a plus qu'à verser la solution de ferrocyanure de potassium à l'intérieur du vase que l'on immerge en même temps dans la solution de sulfate de cuivre. Il est préférable de laisser séjourner l'appareil pendant plusieurs jours dans les solutions membranogènes de façon que la membrane ait une épaisseur suffisante.

C'est par une étude physique sur l'action des courants alternatifs de haute tension dans les échanges osmotiques que j'ai commencé mes recherches. Voici le dispositif expérimental que j'ai adopté.

Un vase de PFEFFER était fermé avec un bouchon de caoutchouc à deux trous ; l'un muni d'un tube très étroit permettant d'apprécier facilement la vitesse du courant d'endosmose par l'ascension de la solution, l'autre laissant passer un tube fermé à son extrémité inférieure, destiné à contenir une des électrodes. Le vase immergé dans l'eau, où plongeait la deuxième électrode, était entouré d'une enceinte calorimétrique afin d'éviter les variations de température pendant l'expérience. Un

thermomètre placé dans le liquide, ou plongeant dans la solution contenue dans l'osmomètre, permet d'ailleurs de s'assurer que la température demeure sensiblement constante.

La source d'électricité était constituée par une bobine d'induction alimentée par une batterie d'accumulateurs. Un rhéostat permettait de régler l'intensité du courant inducteur, contrôlée d'ailleurs par un ampèremètre intercalé dans le circuit. Dans mes premières expériences je me bornais à mesurer l'intensité de ce courant ; mais par la suite j'ai trouvé préférable de mesurer le potentiel explosif aux bornes de l'induit.

Dans mes diverses expériences je n'ai jamais observé de phénomènes d'électrolyse : d'ailleurs j'opérais souvent avec des solutions non électrolysables. Mais, même avec des électrolytes, la gaine de verre entourant l'une des électrodes suffit à empêcher le phénomène. — On peut d'ailleurs placer les deux électrodes à l'intérieur du vase, dans la solution même, ou toutes deux à l'extérieur, à condition que le vase soit compris dans le champ du courant. Les effets observés ainsi diffèrent seulement d'intensité. Le phénomène étudié est donc distinct de celui que J. PERRIN a désigné seulement sous le nom d'osmose électrique dans ses remarquables travaux (de 1903) continués par M. BAUDOIN (1904) et Pierre GIRARD (1909-1911). — D'ailleurs on peut renverser le sens du courant inducteur sans modifier les effets produits, et cependant on inverse ainsi le sens du champ, dû au courant induit de rupture, dont l'action est prédominante. Il ne s'agit donc pas d'un transport d'ions ni d'un phénomène d'anaphorèse ou de cataphorèse.

Méthode de mesure.

Les observations et mesures que j'ai ainsi faites sont principalement des mesures de vitesses osmotiques et non de pressions. Ce procédé est d'ailleurs celui qui avait permis à DUTROCHET de découvrir les lois fondamentales de l'osmose, que l'étude des pressions vint ensuite confirmer. Cette méthode a l'avantage de permettre des observations multiples dans un temps relativement court et d'apprécier aussi les variations du pouvoir osmotique de solutions concentrées qui donneraient des pressions

énormes, auxquelles aucune membrane ne pourrait résister.

Au point de vue physiologique, la vitesse osmotique est au moins aussi intéressante à considérer que la pression, la rapidité de la croissance d'une cellule par exemple dépendant surtout de la vitesse avec laquelle elle absorbera ses aliments et le liquide extérieur.

Je mesurais donc la vitesse osmotique normale ou vitesse initiale V_0 puis, faisant passer le courant, j'observais la vitesse ainsi modifiée V_m ; après suppression du courant, je mesurais dans certains cas la vitesse restante V_p .

Ces vitesses étaient mesurées par une série d'observations dont je faisais ensuite la moyenne, j'observais au cathétomètre la vitesse d'ascension du ménisque dans le tube en notant le temps employé à parcourir 1 centimètre. L'observation était répétée cinq ou dix fois, de centimètre en centimètre afin de contrôler la régularité du courant osmotique... Trois séries de cinq à dix mesures me permettaient ainsi d'établir les temps moyens T_0 , T_m et T_p . L'inverse du rapport des temps donne le rapport des vitesses et permet d'apprécier les variations produites par le passage du courant.

Mes premières recherches avaient porté sur deux corps types ; l'azotate de potassium et le saccharose ; je les ai étendues par la suite à d'autres substances organiques ou minérales : sulfates de sodium, de magnésium, de cuivre, chlorures de sodium, de potassium, pour lesquelles j'ai trouvé des résultats comparables à ceux que j'avais obtenus pour l'azotate de potassium. J'ai étudié d'autre part des solutions colloïdales, les unes stables comme celles de gomme arabique ou de dextrine, les autres instables comme le ferrocyanure de cuivre, le sulfure de cadmium et le bleu de Prusse qui présentent des analogies avec les solutions de saccharose au point de vue du phénomène étudié. C'est le résultat de ces diverses recherches que je vais condenser.

Accroissement de la vitesse osmotique.

Quelle que soit la solution étudiée, j'ai toujours observé une accélération notable du courant d'endosmose pendant le pas-

sage du courant. Dès mes premières expériences, qui étaient surtout qualitatives, car je n'avais pas fait de mesures de potentiel, j'ai été frappé par la variation considérable qui s'est manifestée. Ainsi pour une solution de saccharose à 10 p. 100, le temps initial T_o était de 11 min. 23 sec. par centimètre et le temps moyen pendant l'expérience, T_m , passait à 2 min. 37 sec. Le rapport des vitesses était donc de 4,3. Avec une solution à 20 p. 100 j'avais obtenu de même :

$$T_o = 4 \text{ min. } 54 \text{ sec.}$$

$$T_m = 2 \text{ min. } 4 \text{ sec.}$$

soit un rapport de $\frac{V_m}{V_o} = 1,83$ pour un courant inducteur de 1 amp. 5 et en portant le courant à 2 amp. 5 le temps T_m devenait 2 min. 2 sec. Le rapport $\frac{V_m}{V_o}$ passait ainsi à 2,4.

Avec une solution d'azotate de potassium à 10 p. 100 j'avais également obtenu

$$T_o = 3 \text{ min. } 0 \text{ sec. } 1/5.$$

$$T_m = 1 \text{ min. } 49 \text{ sec.}$$

$$\frac{V_m}{V_o} = 1,65.$$

Une solution de chlorure de sodium à 5,85 p. 100 (solution normale) m'a donné de même

$$T_o = 3 \text{ min. } 41 \text{ sec.}$$

$$T_m = 1 \text{ min. } 37 \text{ sec.}$$

$$\frac{V_m}{V_o} = 2,27.$$

De ces premières expériences je pus dégager quelques conclusions provisoires que je m'occupai ensuite de vérifier :

1° Que l'accroissement de vitesse osmotique paraissait varier en sens inverse de la concentration ;

2° Qu'il était fonction de la différence de potentiel sous laquelle s'effectue la décharge ;

3° Enfin, ayant observé comment se comportaient mes osmomètres après la suppression du courant je vis que les solutions d'azotate de potassium et de chlorure de sodium conservaient encore leur pouvoir osmotique accru, tout au moins pendant un certain temps, ne reprenant que peu à peu leur vitesse primitive. Les solutions de saccharose, au contraire, perdent instan-

tanément leur accroissement de vitesse dès que le courant cesse d'agir : il se produit même une dépression assez sensible, que j'ai appelée dépression post-électrique, et qui est d'autant plus forte que la vitesse initiale avait été plus modifiée.

Ainsi, dans les deux expériences citées plus haut la valeur de cette dépression fut :

Solution à 10 p. 100	20 mm. 85
Solution à 20 p. 100	8 mm. 45

La vitesse reprenait ensuite une valeur voisine de la vitesse initiale.

Cette dépression n'apparaît pas lorsque la solution de sucre contient une quantité, même faible, d'un électrolyte.

Sur ces indications j'ai repris, d'une manière plus précise, l'étude de l'influence de la concentration et de l'influence de la différence de potentiel.

I. — Influence de la concentration des solutions sur l'accroissement de vitesse osmotique.

Je me suis servi pour cette recherche de solutions de saccharose et d'azotate de potassium. Je partais d'une solution à 24 p. 100 que je dédoublais successivement par dilution avec de l'eau distillée de façon à obtenir des solutions à 12 p. 100, 6 p. 100, 3 p. 100 et 1 p. 100. Je disposais mes expériences de manière à éliminer toute autre cause de variations. Pour cela, j'opérais avec le même appareil, à l'obscurité et à température constante, les électrodes étant toujours disposées de la même façon. Afin d'obtenir aux bornes de l'induit une différence de potentiel constante, je réglais le régime du courant inducteur au moyen du rhéostat et de la vis de réglage du trembleur, de manière à obtenir entre deux sphères de laiton de 1 centimètre de rayon des étincelles de longueur déterminée. Je mettais ensuite les bornes en relation avec les électrodes.

Suivant la méthode précédemment indiquée, je mesurais des rapports de vitesses. Ces rapports sont intéressants en ce qu'ils paraissent indépendants de la valeur absolue de la vitesse ini-

tiale, laquelle peut varier, dans des expériences faites en des conditions qui paraissent identiques, en raison sans doute du degré de polarisation de la membrane (P. GIRARD a montré en effet que les molécules qui traversent la membrane emportent une charge électrique et finissent par déterminer une polarisation qui diminue la perméabilité). Ainsi, j'ai trouvé dans deux expériences consécutives, faites avec la même solution d'azotate de potassium à 6 p. 100 les nombres suivants.

1 ^{er} cas . . .	$T_o = 5 \text{ min.}$	$T_m = 4 \text{ min. } 20 \text{ sec.}$
2 ^e cas. . . .	$T_o = 7 \text{ min.}$	$T_m = 6 \text{ min.}$

Ces nombres sont très différents, mais si l'on calcule le rapport $\frac{V_m}{V_o}$ on trouve dans le premier cas 1,15, dans le deuxième 1,16, nombres concordants à un centième près. Je ne me suis pas préoccupé de la correction de température qui n'eût modifié que d'une quantité négligeable par rapport aux erreurs d'observation la valeur absolue des nombres trouvés et n'eût pas changé la valeur du rapport. Cette température que je notais à titre d'indication demeurerait d'ailleurs constante pendant les expériences à un dixième de degré près.

Les mesures que j'ai ainsi effectuées correspondent à un potentiel pouvant produire une étincelle de 5 millimètres (soit 16.450 volts d'après MASCART). Pour les solutions de saccharose, j'ai fait une deuxième série de mesures avec un potentiel explosif de 2 millimètres (soit 8.250 volts). Les résultats numériques ainsi obtenus sont résumés dans les tableaux suivants :

1^o Solutions de NO^3K = Potentiel 16.450 volts (Etincelle 5 mm.).

Titre	T_o	T_m	Rapport $\frac{V_m}{V_o}$	Température
1 p. 100	20 m.	10 m. 30 s.	1,9	16°4
3 p. 100	5 m. 21 s.	3 m. 46 s.	1,42	15°7
4 p. 100	7 m. 50 s.	6 m. 15 s.	1,25	14°
6 p. 100	5 m.	4 m. 20 s.	1,15	16°3
12 p. 100	3 m. 40 s.	3 m. 18 s.	1,11	11°4
24 p. 100	2 m. 25 s.	2 m. 15 s.	1,074	11°3

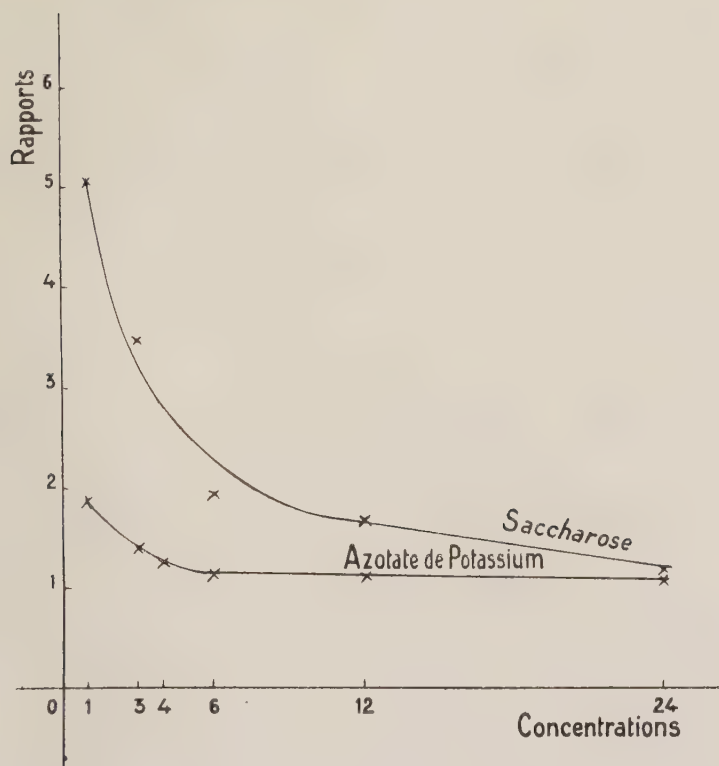


Fig. 4. — Variation des vitesses osmotiques pour des solutions de différentes concentrations (Potentiel explosif = 5 millimètres).

II. — Solutions de saccharose.

1^{er} cas. — Potentiel 8.250 volts (Étincelle 2 mm.).

Titre	To	Tm	Rapport $\frac{Vm}{Vo}$	Température
—	—	—	—	—
1 p. 100	20 m. 25 s.	13 m. 5 s.	1,56	21°8
3 p. 100	12 m. 30 s.	9 m. 5 s.	1,37	23°6
6 p. 100	5 m. 1 s.	4 m.	1,25	20°
12 p. 100	3 m. 45 s.	3 m. 19 s.	1,12	19°5
24 p. 100	3 m. 25 s.	3 m. 8 s.	1,09	17°6

Dans aucune des expériences de ce tableau je n'ai constaté de dépression post-électrique après interruption du courant.

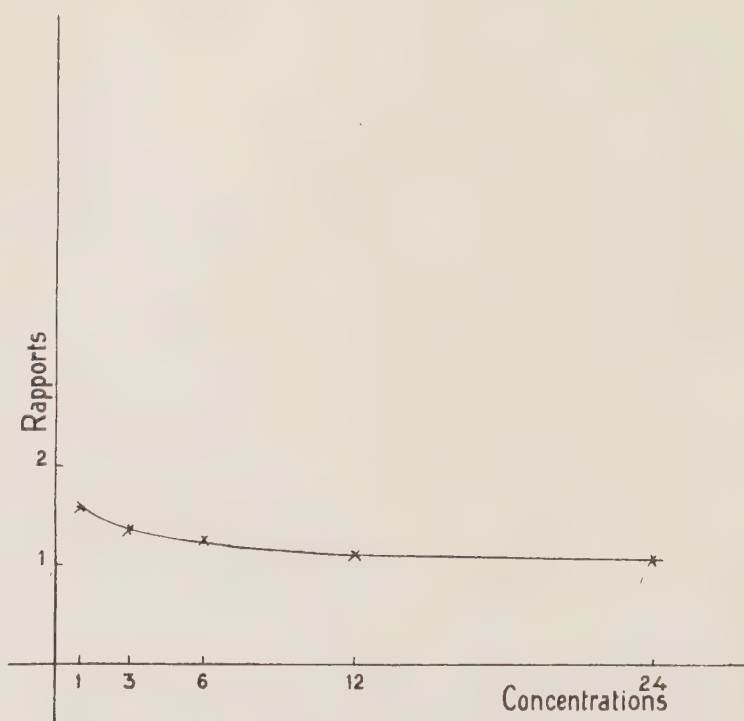


Fig. 2. — Variation des vitesses pour des solutions de saccharose (Potentiel explosif = 2 millimètres).

2^e cas. — Potentiel 16.450 (Étincelle 5 mm.).

Titre	To	Tm	Rapport $\frac{Vm}{Vo}$	Température
—	—	—	—	—
1 p. 100	17 m. 45 s.	3 m. 25 s.	5,04	22°1
3 p. 100	12 m. 30 s.	3 m. 35 s.	3,48	23°6
6 p. 100	5 m. 25 s.	2 m. 45 s.	1,96	20°
12 p. 100	4 m. 22 s.	2 m. 35 s.	1,69	19°5
24 p. 100	3 m. 36 s.	3 m.	1,20	17°6

Dans les deux premiers cas, une dépression post-électrique s'est manifestée; elle fut de 1 mm. 40 dans le premier cas, 1 mm. 15 dans le second.

Il est intéressant de traduire par des courbes ces résultats numériques en portant en abscisses des longueurs proportion-

nelles aux concentrations et en ordonnées les valeurs des rapports. Pour les expériences des deux premiers tableaux les points figuratifs ainsi déterminés se placent assez près de courbes régulières qui se relèvent rapidement en se rapprochant de l'axe des ordonnées. Pour les expériences du 3^e tableau, la courbe se relève beaucoup plus vite, mais les points figuratifs s'en écartent un peu plus. J'ai réuni sur le même graphique les deux courbes relatives aux solutions de saccharose et d'azotate de potassium pour un même potentiel explosif de 5 mm.

Ce rapprochement permet de remarquer 1^o que la valeur du rapport $\frac{V_m}{V_o}$ croît avec la dilution et plus rapidement qu'elle lorsqu'on arrive à des solutions suffisamment étendues ; 2^o que cet accroissement est plus considérable pour les solutions de saccharose que pour celles d'azotate de potassium.

Il convient de remarquer en outre que la dépression post-électrique n'apparaît ici que lorsque la valeur du rapport est supérieure à 3.

L'inégalité de concentration moléculaire ne suffit pas à expliquer la différence très nette qui sépare les solutions de saccharose et d'azotate de potassium. Ainsi j'ai pu constater, en opérant dans des conditions identiques avec des solutions isotoniques de saccharose à 5,13 p. 100 et d'azotate à 1,01 p. 100 que la valeur du rapport était de 2,24 pour la première solution et de 1,98 pour la seconde.

L'aspect de la deuxième courbe relative aux solutions de saccharose pour un potentiel explosif de 2 millimètres nous montre que l'accroissement de vitesse est beaucoup plus faible que dans l'autre cas. J'ai recherché comment varie le phénomène en fonction du potentiel pour des solutions de concentration déterminée.

Accroissement de vitesse osmotique en fonction du potentiel.

Pour cette recherche, j'ai employé successivement deux procédés ; le premier est celui dont j'ai déjà parlé précédemment et qui consiste à régler l'alimentation de la bobine de façon à obtenir aux bornes de l'induit une différence de potentiel con-

stante. Naturellement il est nécessaire de recommencer le réglage et de mesurer l'étincelle, chaque fois que l'on modifie les conditions de l'expérience, ce qui cause une légère perte de temps susceptible de fausser les mesures.

Le deuxième procédé est d'un emploi plus commode. Il consiste à utiliser des décharges oscillantes de haute fréquence dont l'effet est analogue à celui des courants alternatifs de basse fréquence, comme je l'avais précédemment observé. J'obtenais ces décharges en reliant aux électrodes de l'osmomètre les armatures extérieures de deux condensateurs dont les armatures intérieures étaient reliées aux bornes de l'induit et aux boules d'un déflagrateur. En écartant plus ou moins ces boules, on peut régler le potentiel explosif sans interrompre les mesures. La seule difficulté vient du fait que l'air devient rapidement conducteur entre les sphères de laiton et qu'il est indispensable d'assurer le soufflage permanent des étincelles. Pour éviter cette complication je remplaçai le déflagrateur à boules par un autre à pointes de cuivre immergées dans l'huile de naphte et gradué par comparaison avec le premier.

Voici le résultat des mesures ainsi effectuées.

I. — Courants de basse fréquence.

A. — Solution de NO^3K à 20 p. 100. — Température $+ 18$.

Longueurs d'étincelle	Potentiels	Temps moyens
0 mm.	0 volt	4 m. 40 s. = T_0
1	4.830 volts	2 m. 43 s.
2	8.250	2 m. 8 s.
3	11.350	1 m. 52 s.
4	14.300	1 m. 43 s.
5	16.450	1 m. 38 s.

B. — Solution de saccharose à 20 p. 100. — Temp. $+ 17^{\circ}6$.

Longueur d'étincelle	Temps moyens
0	8 m. 58 s. = T_0
1	5 m. 24 s.
2	3 m. 13 s.
3	2 m. 10 s.
4	1 m. 41 s.
5	1 m. 17 s.

II. — Courants de haute fréquence.

Solution de saccharose à 10 p. 100. — Température + 17°5.

Longueur d'étincelle dans l'air	Temps moyens
0	9 m. 30 s. = T_0
1	6 m. 50 s.
2	5 m. 26 s.
3	4 m. 30 s.
4	3 m. 46 s.
5	3 m. 15 s.

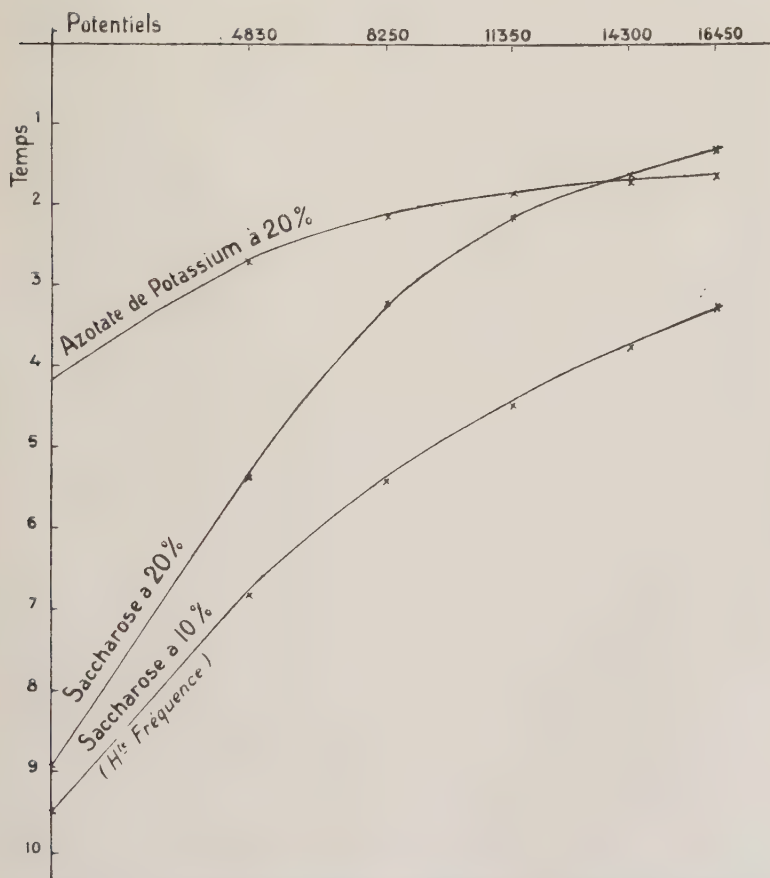


Fig. 3. — Variations des vitesses osmotiques en fonction du potentiel.
Pelous.

On pourrait, comme précédemment, calculer le rapport $\frac{Vm}{Vo}$ et construire la courbe des variations de vitesse. Mais comme toute l'expérience est faite avec la même solution, j'ai trouvé plus simple de construire ces courbes en portant les potentiels en abscisses et les temps en ordonnées négatives. On voit que la vitesse osmotique croît d'abord rapidement avec le potentiel, puis beaucoup moins vite, de sorte que les courbes tendent à devenir asymptotes à l'axe des abscisses.

Il m'a paru intéressant de tracer sur un même graphique les courbes correspondant aux expériences précédentes afin de les comparer aisément. On voit en examinant les deux premières, que la courbe du saccharose se relève beaucoup plus rapidement que celle de l'azotate de potassium. Ce fait semble normal, étant donné ce que nous savons de l'influence de la concentration, si nous considérons la valeur des masses moléculaires des deux substances, qui sont 342 et 101. Des solutions à 20 p. 100, même en négligeant l'ionisation de l'une d'elles, sont loin d'être équimoléculaires. Mais il est plus surprenant de voir, pour une tension de 14.300 volts, la courbe du saccharose traverser celle de l'azotate, c'est-à-dire la vitesse osmotique de la première substance dépasser la valeur de celle de la deuxième. Je proposerai plus loin une explication de ce phénomène.

La troisième courbe se rapportant à une solution de saccharose plus diluée devrait se relever plus rapidement que la deuxième si l'action des décharges de haute fréquence était identique à celle des décharges de fréquence plus basse. Or, elle se relève moins vite : il semble donc que les courants de haute fréquence agissent moins efficacement sur le phénomène osmotique. Cependant, pour les courants induits obtenus avec la bobine, on observe que l'accélération croît lorsque la fréquence augmente. Mais entre des fréquences de l'ordre d'une centaine de périodes et celles des décharges oscillantes qui peut aller jusqu'à cent mille, il y a une vaste lacune que je n'ai pu explorer. Peut-être existe-t-il entre ces deux extrêmes une fréquence optima, variable avec la grosseur des molécules, pour laquelle ces dernières deviendraient le siège d'un phéno-

mène de résonance : la vitesse osmotique deviendrait alors maxima.

Cependant l'action des décharges oscillantes peut conduire en physiologie à des applications intéressantes ; elles permettent en effet d'agir sur les échanges osmotiques sans exciter le protoplasma cellulaire et sans déterminer sa contraction.

Variation de la pression osmotique.

La croissance d'une cellule étant fonction de la vitesse avec laquelle elle absorbe et assimile, je recherchais surtout les causes qui font varier cette vitesse. Il me paraissait moins intéressant de déterminer si la pression osmotique finale était modifiée par l'action des courants.

Toutefois j'ai tenté cette vérification pour compléter ma documentation et contrôler l'explication du phénomène que j'avais imaginée.

J'ai placé dans un vase de PFEFFER une solution très diluée de saccharose à 0,05 p. 100 légèrement colorée avec une solution de fuchsine. Au bout de deux semaines le niveau du liquide s'est fixé à une hauteur de 435 millimètres au-dessus du liquide extérieur ; la température étant de 22°4. Ce niveau s'est d'ailleurs maintenu pendant près de dix mois, sauf de légères variations dues aux variations de température. Il se serait peut-être maintenu plus longtemps encore si je n'avais arrêté l'expérience. A plusieurs reprises j'ai soumis l'appareil à l'action du courant : la pression s'élevait alors, puis reprenait après l'expérience sa valeur primitive. Ainsi dans une expérience, l'accroissement temporaire de pression fut de 49 mm. 85 d'eau ; la durée du retour à l'état primitif par dépression post-électrique fut de 12 heures environ.

La vitesse osmotique n'est donc pas seule modifiée, mais aussi la pression limite, ainsi qu'on pouvait le prévoir.

Actions de la lumière sur les échanges osmotiques.

On sait, depuis les travaux de MAXWELL, les relations étroites qui unissent les phénomènes électriques alternatifs aux ondes

lumineuses. Des considérations théoriques auraient donc pu me conduire à faire quelques recherches dans ce sens. Mais ce point de vue ne m'était pas apparu tout d'abord. C'est le hasard qui a attiré mon attention sur cet ordre d'idées. Dans mes premières expériences je ne m'étais pas préoccupé de maintenir constante l'intensité de l'éclairement ; mais pratiquement elle l'était à peu près dans le petit laboratoire où j'opérais d'habitude. Mais j'observai un jour des irrégularités de la vitesse initiale plus accusées que d'ordinaire. Comme le ciel était nuageux et que le soleil apparaissait par intermittences, je remarquai que la vitesse du courant osmotique paraissait suivre les variations d'éclairement. Je recouvris alors mon osmomètre d'un écran en papier noir et je vis la vitesse devenir à partir de ce moment sensiblement uniforme.

Depuis cette observation j'opérai toujours à l'obscurité, plaçant l'osmomètre dans une boîte en bois, noircie intérieurement, d'où émergeait seulement le tube manométrique dans lequel j'observais l'ascension du liquide.

J'ai repris ensuite l'étude de ce phénomène particulier.

L'influence de la lumière est toujours accélératrice. Elle se fait sentir aussi bien sur un osmomètre opaque que sur un appareil muni d'une armature de verre. Dans ce dernier cas elle se manifeste encore si la solution seule est éclairée à travers l'armature et la membrane maintenue à l'obscurité : elle est seulement moins accusée. Elle agit sur les solutions incolores comme sur les solutions colorées. Il est fort probable que son action s'exerce également sur la membrane.

Croyant tout d'abord à une action photochimique qui aurait produit un dédoublement moléculaire j'ai employé des solutions assez complexes de substances organiques (vin rouge, solution d'acide tartrique, solution alcoolique de chlorophylle). Cependant le fait que l'accroissement ne persiste pas lorsque l'appareil est replacé à l'obscurité m'a fait penser que cette action était toute différente. J'ai été ainsi amené à constater le même phénomène pour des solutions de chlorure de sodium et d'azotate de potassium.

Voici quelques-uns des résultats obtenus.

Solution	To (obscurité)	Tm (lumière diffuse)
—	—	—
Acide tartrique.	25 m.	17 m.
Vin rouge	8 m. 15 s.	5 m. 20 s.
Sol. alcoolique de chlorophylle . . .	9 m. 15 s.	6 m. 12 s.

La lumière artificielle donne des résultats plus facilement mesurables et d'ailleurs l'éclairement direct accélère davantage le phénomène.

Ainsi, avec un extrait aqueux de feuilles de lilas j'ai obtenu :

To (obscurité)	5 m. 36 s.	
Tm ¹ (lum. diffuse).	4 m. 48 s.	$\frac{Vm^1}{Vo} = 1,16$
Tm ² (une bougie à 0 m. 50). . . .	2 m. 36 s.	$\frac{Vm^2}{Vo} = 2,15$

Ainsi la lumière d'une simple bougie, placée à 50 centimètres, détermine une variation supérieure à celle que produit la lumière diffuse du jour.

Les sources lumineuses artificielles permettent en outre de faire varier facilement l'intensité de l'éclairement et d'observer ainsi les variations correspondantes de vitesse osmotique.

Les tableaux suivants résument une série d'observations que j'ai ainsi effectuées avec des sources lumineuses de nature et d'intensité différentes.

1° Solution alcoolique de chlorophylle.

Source lumineuse	Intensité d'éclairement (en bougies-mètre ou lux)	Temps
—	—	—
Obscurité.	0	15 m. 47 s.
1 bougie à 0 m. 50 . . .	4	9 m.
4 bougies à 0 m. 50 . . .	16	5 m.

2° Solution de saccharose à 10 p. 100.

Source lumineuse	Intensité relative d'éclairement	Temps
—	—	—
Obscurité	0	90 m. 54 s.
Bec Auer à 1 m. 20. . .	1	40 m.
» à 0 m. 60. . .	4	26 m.
» à 0 m. 30. . .	16	16 m.

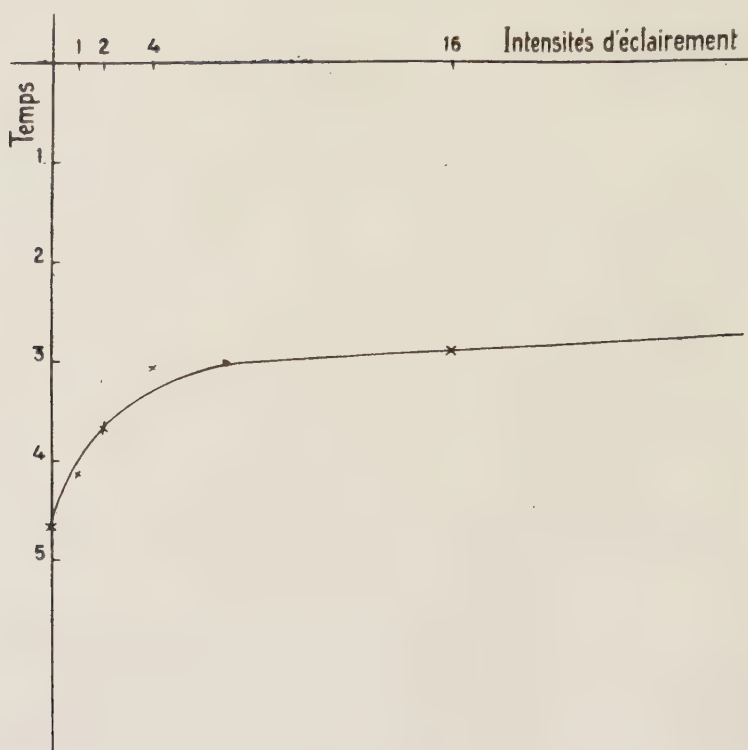


Fig. 4. — Variation de la vitesse osmotique d'une solution de saccharose à 20 p. 100, en fonction de l'intensité d'éclairement.

3° Solution de chlorure de sodium à 10 p. 100.

Source lumineuse	Intensité relative	Temps
Obscurité	0	19 m. 10 s.
Bec Auer à 1 m. 20. .	1	18 m.
» à 0 m. 60. .	4	16 m. 35 s.
» à 0 m. 30. .	16	12 m. 25 s.

4° Solution de saccharose à 20 p. 100.

Intensité d'éclairement (en bougies-mètre)	Temps
Obscurité.	4 m. 40 s.
1 bougie-mètre	4 m. 7 s.
2 »	3 m. 40 s.
4 »	3 m. 3 s.
16 »	2 m. 54 s.
100 »	1 m. 45 s.

En construisant les courbes de ces variations comme je l'ai fait précédemment pour les variations en fonction du potentiel, c'est-à-dire en portant les temps en ordonnées négatives et les intensités d'éclairement en abscisses, on obtient des graphiques de même allure que ceux que j'ai obtenus pour l'action des courants électriques : ici encore, après s'être relevée rapidement, la courbe tend vers une asymptote. L'action de la lumière produit donc des effets comparables à ceux des courants alternatifs.

Par contre, l'influence de la concentration paraît ici négligeable ou à peu près, au contraire de ce qui a lieu pour l'action électrique. J'ai étudié cette influence à l'aide de solutions d'azotate de potassium et j'ai fait pour chacune d'elles deux séries de mesures avec deux intensités d'éclairement qui étaient dans le rapport de 1 à 4. La source était un bec papillon placé à 0 m. 60 puis à 0 m. 30 de l'appareil. J'ai ainsi trouvé :

Solutions de NO_3K

Titre	T_0	Tm^1	Rapport $\frac{Vm^1}{V_0}$	Tm^2	Rapport $\frac{Vm^2}{V_0}$
6 p. 100	8 m. 41 s.	5 m. 4 s.	1,63	2 m. 28 s.	3,31
5 p. 100	9 m. 30 s.	5 m. 47 s.	1,64	3 m. 10 s.	3
4 p. 100	8 m. 42 s.	4 m. 55 s.	1,66	2 m. 30 s.	3,28
3 p. 100	7 m. 52 s.	5 m. 12 s.	1,51	2 m. 33 s.	3,08

Les valeurs des différents rapports sont donc très voisines pour un éclairement donné. On pourrait même les considérer comme identiques, aux erreurs d'expérience près.

Je n'ai pas poussé plus loin ces recherches, qui, sans être absolument en dehors de mon sujet, constituaient cependant une sorte de digression. Au point de vue physique il serait cependant intéressant d'observer l'action des radiations de longueurs d'onde différentes sur les solutions diversement colorées et les variations qui peuvent résulter de l'intensité de leur coloration et de leur pouvoir absorbant. — Peut-être trouverait-on dans cette action de la lumière une explication assez simple du phototropisme négatif si net dans certaines racines. Quant au phototropisme positif des jeunes tiges, il ne s'expli-

querait que par une action différente de la lumière, de nature chimique probablement, assez intense pour dominer et masquer complètement l'accroissement de vitesse osmotique.

Conclusions.

Les résultats des expériences précédentes peuvent se résumer comme il suit :

1° Lorsqu'une solution contenue dans un osmomètre de PFEFFER se trouve placée dans le champ d'un courant alternatif de haute tension, sa vitesse osmotique est accélérée ;

2° Cet accroissement de vitesse, mesuré par le rapport $\frac{V_m}{V_o}$ de la vitesse modifiée à la vitesse initiale, est une fonction de l'intensité du champ, donc de la différence de potentiel aux électrodes lorsque l'écartement de ces dernières est maintenu constant. Toutefois cet accroissement n'est pas proportionnel à la tension ; la vitesse augmente moins rapidement que le potentiel et semble tendre vers une limite ;

3° La valeur du rapport $\frac{V_m}{V_o}$, pour une substance déterminée, augmente avec la dilution de la solution ;

4° Les courants oscillants de haute fréquence produisent les mêmes effets que les courants alternatifs de basse fréquence, mais, à égalité de tension, ces effets sont moins intenses ;

5° La pression osmotique limite développée par une solution est accrue temporairement par l'action du champ électrique alternatif ;

6° L'accroissement de vitesse osmotique est, toutes choses égales d'ailleurs, plus considérable pour les solutions de saccharose que pour les solutions d'azotate de potassium ou autres électrolytes étudiés (chlorures de sodium et de potassium, sulfates de sodium, de magnésium et de cuivre) ;

7° Cet accroissement persiste quelque temps après l'expérience dans les solutions électrolysables, puis s'atténue progressivement ;

8° Pour les solutions sucrées au contraire, l'action accélératrice disparaît immédiatement après l'interruption du courant :

lorsque cette accélération atteint une certaine valeur, il se produit après l'expérience une dépression post-électrique d'autant plus considérable que la variation a été plus grande ;

9° Lorsque la solution sucrée contient une certaine quantité d'un électrolyte, cette dépression ne se produit pas ; la vitesse osmotique reprend simplement une valeur voisine de la vitesse initiale ;

10° La lumière exerce sur les phénomènes d'osmose une action comparable à celle des courants alternatifs : cette action est accélératrice et fonction de l'intensité d'éclairement. Toutefois cet accroissement de vitesse paraît indépendant de la concentration.

J'ajouterai par anticipation une dernière conclusion relative à des faits que je vais exposer dans les pages qui suivent :

11° Les solutions colloïdales organiques ou minérales présentent, au point de vue de l'action des courants électriques, de grandes analogies avec les solutions de saccharose.

Je vais essayer maintenant de donner une interprétation théorique de ces résultats et d'expliquer le mécanisme de l'action électrique.

Interprétation des résultats.

Les explications données par DUTROCHET, PFEFFER et NÖGELI font comprendre aisément le mécanisme de l'osmose. Toute membrane osmotique serait constituée par un agrégat de particules ultra-microscopiques, mais relativement volumineuses appelées micelles ou tagmas, comme celles qui forment les solutions colloïdales. Ces micelles sont entourées d'une couche d'eau d'adhésion. Si ces particules sont assez espacées il existe de plus entre elles une série d'espaces capillaires également remplis d'eau. Ce cas serait celui des membranes perméables : les molécules dissoutes peuvent ainsi traverser la membrane par ces espaces capillaires grâce à leurs mouvements propres. Dans le cas des membranes hémiperméables, toute l'eau qui y est contenue serait de l'eau d'adhésion ; les molécules de la solution ne peuvent franchir la sphère de protection de la particule colloïdale. Les mouvements propres de ces molécules

auraient simplement pour effet de les projeter contre les tagmas. Mais à chaque contact, la molécule en solution, beaucoup plus petite que le tagma, et par conséquent possédant une attraction capillaire beaucoup plus considérable, dépouillerait celui-ci d'une partie de son eau d'adhésion qu'il emporterait en s'écartant. Le tagma reprendrait ensuite de l'eau à l'extérieur de la membrane.

Cette explication simple n'est pas en contradiction avec l'hypothèse de VAN T' HOFF, mais avec l'expression qu'on en donne quelquefois.

L'assimilation de l'état dissous à l'état gazeux a fait considérer parfois que la pression osmotique était due aux chocs particuliers sur la membrane de l'osmomètre comme la pression gazeuse est produite par les chocs sur les parois du récipient qui contient le gaz. La pénétration du solvant en sens inverse de la force osmotique devient alors inexplicable. Il y a là, à mon avis, une erreur de raisonnement. La pression que subit la paroi de l'osmomètre est simplement une contre-pression, purement hydrostatique, qui s'oppose au courant d'endosmose et limite d'ailleurs le phénomène. S'il en était autrement on observerait sur les parois d'un vase imperméable une pression plus considérable que la pression hydrostatique calculée en tenant compte de la densité de la solution. En réalité, comme le fait remarquer justement DASTRE, le contenant du corps dissous n'est pas le vase de PFEFFER ; c'est le solvant, dont les particules en solution tendent à écarter les molécules en s'entourant d'une couche d'adhésion de plus en plus épaisse. La loi de VAN T' HOFF d'ailleurs ne fait intervenir que le volume du solvant et non celui du récipient.

Quelle peut être sur une solution en équilibre statistique, où les molécules dissoutes se meuvent et s'entrechoquent avec une parfaite irrégularité l'action d'un champ électrique ?

On sait que chacune de ces molécules possède une charge électrique propre ; soit qu'elle constitue un ion, soit qu'elle se soit chargée au contact du solvant. D'ailleurs des molécules neutres se chargeraient immédiatement par influence au passage du courant.

Comme ce courant est alternatif, il n'y a pas transport de

particules ; elles sont simplement soumises à des attractions et répulsions alternatives dont l'effet est d'orienter leurs mouvements propres suivant les lignes de force du champ. L'effet maximum sera obtenu lorsqu'une des électrodes sera placée à l'intérieur de la membrane, l'autre à l'extérieur. Grâce à la conductibilité de l'eau les mouvements particuliers seront alors tous orientés perpendiculairement à la membrane. Dans le cas où les deux électrodes sont à l'extérieur et de part et d'autre de l'osmomètre, les lignes de force ne traversent normalement que la partie de la membrane qui fait face aux électrodes et l'effet produit est moins accusé.

On obtiendrait le même effet d'orientation avec un champ de sens déterminé, mais discontinu, tel que celui qu'on obtient en ménageant une coupure sur le circuit induit : à chaque interruption du courant les mouvements particuliers reprendront leur indépendance pour s'orienter de nouveau à chaque période du courant. L'effet de cette orientation serait donc de multiplier les chocs des molécules contre la membrane : l'accélération du courant d'endosmose qui en résulte s'explique ainsi facilement. On comprend aisément que cette orientation sera d'autant plus parfaite que le champ électrique sera plus intense ; or ce dernier dépend de la différence de potentiel aux électrodes. La fréquence du courant doit être assez grande pour maintenir les particules orientées. Peut-être existe-t-il une fréquence optima, dépendant pour chaque substance de la masse des molécules ou des ions, pour laquelle une résonance se produirait, ce qui ajouterait à l'orientation un accroissement de l'énergie particulière ; la vitesse osmotique atteindrait alors son maximum.

Si la solution est diluée, les particules actives sont très écartées par les molécules du solvant : elles auront moins de chances de se gêner mutuellement en s'entre-choquant, leur orientation sera plus aisée et l'action du champ plus efficace. C'est en effet ce qui résulte de mes mesures ; ce sont les solutions diluées qui donnent les rapports les plus grands, pour un potentiel donné.

Cette hypothèse pourrait expliquer en partie la valeur des rapports trouvés. En effet, les mouvements des particules dans

le solvant, quoique parfaitement irréguliers, peuvent être rapportés à trois axes rectangulaires de coordonnées dont l'un serait perpendiculaire à la membrane. Leur énergie se répartit également sur ces trois axes, mais seuls les mouvements qui se projettent sur l'axe perpendiculaire à la membrane produisent un effet osmotique.

Si tous les déplacements étaient orientés suivant cet axe unique, l'effet osmotique serait triplé; l'orientation ayant ainsi ramené de trois à un seul, le nombre des degrés de liberté de la particule.

Pour les électrolytes il semble bien en être ainsi : tous les rapports sont inférieurs à 3, la valeur la plus élevée que j'aie trouvé est 2,55 pour NO_3K . L'allure de la courbe donnant les variations des vitesses en fonction du potentiel et qui tend à devenir asymptote à l'axe des tensions, donne à penser que la valeur 3 est un maximum que le rapport ne peut dépasser, ni d'ailleurs pratiquement atteindre. Le courant alternatif ne semble donc pas augmenter l'ionisation, ce qui accroîtrait le nombre des particules actives. La persistance de l'accroissement de vitesse après l'expérience peut s'expliquer par une persistance de l'orientation des particules qui n'arriveraient que progressivement à retomber dans le chaos initial.

Tout différent est le cas des solutions sucrées. Le rapport $\frac{V_m}{V_o}$ peut atteindre dans ce cas, avec un champ d'intensité convenable, des valeurs voisines de 9. En tout cas il peut dépasser la valeur 3 si la solution est suffisamment diluée. Tout se passe comme si le nombre des molécules augmentait au moment du passage du courant.

Le retour immédiat à la vitesse initiale après l'expérience montre que le phénomène est réversible, ce qui exclut la possibilité d'un dédoublement par hydrolyse de la molécule de saccharose. Mais on peut concevoir une fragmentation physique qui ne modifierait pas les propriétés chimiques de ce corps.

Il est probable que les molécules de saccharose en solution constituent des agrégats physiques comparables aux moles ou micelles des solutions colloïdales. Ces groupements de molécules

les pourraient se fragmenter plus ou moins sous l'action du courant, ce qui augmenterait le nombre des particules actives. Après suppression du courant, ces particules s'agrégeraient de nouveau : la dépression post-électrique, qui n'apparaît que lorsque la valeur du rapport dépasse 3, indique que ces modifications seraient accompagnées d'une légère variation de volume.

MM. FOUARD et DE TONNAY-CHARENTE, dans des recherches sur l'osmométrie des solutions salines, sont arrivés à la même conclusion touchant la constitution des solutions sucrées. Ces auteurs tirent de leurs mesures osmométriques différentielles et même d'anciennes expériences de PFEFFER, la conclusion que l'unité osmotiquement active du saccharose serait représentée par la formule $(C_{12}H_{22}O_{11})^3$.

L'absence de dépression post-électrique dans les solutions de saccharose contenant une certaine quantité d'un électrolyte peut s'expliquer par le fait que ce dernier conserve sa vitesse propre qui compense la dépression. On peut aussi supposer que les molécules de saccharose libérées de leurs agrégats, fixent par adsorption des ions libres et forment des groupements nouveaux.

La dépression post-électrique est une variation d'ailleurs très faible de l'ordre du dix-millième du volume total de la solution. On pourrait supposer qu'elle est due à une faible variation de température que le thermomètre n'aurait pas accusée. Mais le fait qu'elle ne se manifeste, ni dans les solutions salines, ni dans les solutions concentrées de saccharose pour les mêmes conditions expérimentales, montre qu'il n'en est rien.

Ayant été ainsi conduit à supposer des analogies entre les solutions de saccharose et les solutions colloïdales, j'ai étudié, à titre de vérification, comment se comportent ces dernières dans le champ du courant. J'ai étudié d'abord des colloïdes organiques stables, puis des colloïdes inorganiques instables rapidement séparés par dialyse des électrolytes qu'ils pouvaient contenir. Cette recherche est très longue, les hydrosols ayant un pouvoir osmotique très faible. J'ai obtenu les résultats suivants :

Solution colloïdale	To	Tm	Rapport	Dépression
Gomme arabique à 20 p. 100.	41 m. 50 s.	8 m. 42 s.	4,36	2 mm. 25
Dextrine à 20 p. 100 . . .	100 m. 9 s.	20 m.	5,04	7 mm. 25
Ferrocyanure de Cu . . .	78 m. 42 s.	8 m.	9,77	3 mm.
Sulfure de cadmium . . .	144 m.	28 m.	5,14	2 mm. 35
Bleu de Prusse	125 m.	20 m.	6,25	2 mm. 50

On voit que ces résultats présentent des caractères communs avec ceux que donnent les solutions sucrées.

1° Le rapport des vitesses peut dépasser la valeur 3.

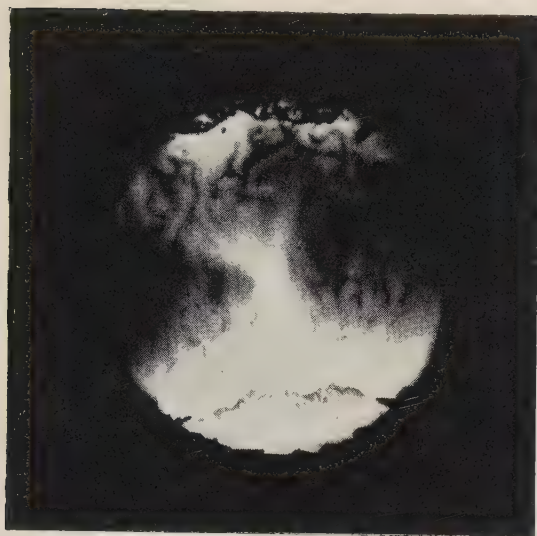
2° Il se produit une dépression post-électrique.

Mais ces observations présentent encore un autre intérêt. Je n'ai jusqu'ici envisagé que l'action du courant sur la solution. Mais il est légitime de penser qu'il existe également une action sur la membrane.

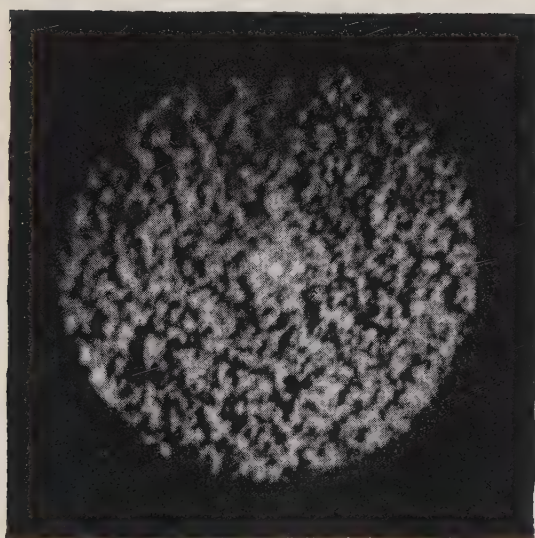
Cette dernière est en effet une solution colloïdale immobilisée dans les pores de la porcelaine. Si ses tagmas se fragmentent sous l'action du champ, ils absorberont une quantité plus grande d'eau d'adhésion et la perméabilité pour l'eau se trouvera augmentée. Malgré tout, ces tagmas seront encore énormes par rapport aux dimensions des molécules des solutions véritables et ils seront obligés de céder à ces dernières l'eau supplémentaire qu'ils auront absorbée : ainsi se trouverait finalement accru le courant d'endosmose.

Pour vérifier les effets d'orientation des mouvements particuliers dans les solutions, j'ai pensé à observer au microscope de fines particules en suspension, qui ne présentent d'ailleurs plus avec les solutions et même les hydrosols que de grossières analogies. Sur une lame porte-objet enduite de paraffine, je ménageais un petit canal entre deux bassins circulaires où aboutissaient des électrodes d'aluminium reliées aux bornes de l'induit d'une bobine.

Les bassins et le canal étant d'abord remplis d'une légère couche d'eau, je déposais au milieu du canal une goutte d'encre de Chine diluée, puis je faisais passer le courant. Si l'interrupteur est bien réglé on voit d'abord la goutte d'encre s'allonger vers les deux pôles ; en même temps se forment des stries longitudinales suivant les lignes de force. Bientôt apparaissent des



Encre de chine.



Suspension de carmin.

Fig. 5. — Effets d'un champ électrique alternatif sur des granules en suspension dans l'eau.

bandes sombres transversales qui deviennent de plus en plus accusées, puis sinueuses et finalement interfèrent. On dirait qu'il s'est produit dans l'eau des ondes stationnaires : les particules d'encre sont déplacées, comme des poussières dans un tuyau sonore, vers les nœuds de vibration. Dès qu'on arrête le courant, ces figures disparaissent par diffusion.

Avec une suspension de carmin dont les grains sont plus gros, on obtient une figure stable que l'on peut conserver en laissant évaporer l'eau. D'abord les grains sont uniformément répartis, quelques-uns présentent des mouvements browniens, mais la plupart sont immobiles. Dès que le courant passe, ils s'agglomèrent en bandes orientées perpendiculairement au champ. Les plus petits qui étaient mobiles s'accrochent aux plus gros et ne bougent plus.

On peut examiner ces apparences sur les microphotographies ci-jointes, assez médiocres en vérité, surtout à cause de l'astigmatisme du faisceau de lumière transmise à travers le ménisque formé par l'eau du petit canal. On y voit néanmoins d'une façon manifeste la preuve que le champ électrique produit dans la solution des vibrations longitudinales orientées dans le sens des lignes de force.

Quant à l'action des vibrations lumineuses, elle peut être expliquée par un mécanisme analogue : orientation des mouvements moléculaires dans les solutions, ou fragmentation des tagmas dans les solutions colloïdales. Ainsi ce dernier mode d'action expliquerait l'augmentation de perméabilité des membranes observée par LEPESCHKIN sur les renflements des pétioles du Haricot et LECLERC DU SABLON sur les feuilles d'*Elodea*.

DEUXIÈME PARTIE

ÉTUDE PHYSIOLOGIQUE

DE L'ACTION DES COURANTS ALTERNATIFS

SUR LES PHÉNOMÈNES OSMOTIQUES

CHEZ LES VÉGÉTAUX

1° PHÉNOMÈNES D'OSMOSE CELLULAIRE

Les données physiques qui se dégagent des observations et des mesures précédentes m'ont servi de guide dans les recherches physiologiques que j'entrepris ensuite. Elles m'ont permis d'établir une méthode d'expérimentation en évitant les tâtonnements et aussi certaines causes d'erreur.

Une des premières conclusions qui s'en dégagent est la nécessité d'éliminer l'action de la lumière, soit en expérimentant à l'obscurité, soit en maintenant l'éclairement constant chaque fois qu'il est nécessaire d'opérer à la lumière. Dans ce cas il est préférable de recourir à la lumière artificielle si l'expérience doit être prolongée pendant un temps appréciable.

La deuxième indication concerne la différence de potentiel à réaliser. Les courbes que j'ai construites montrent qu'il n'est pas nécessaire d'employer des tensions très élevées, puisque, après un relèvement rapide, elles semblent tendre vers une asymptote qui paraît marquer la limite de l'accroissement de vitesse osmotique réalisable par ce procédé. Des tensions de 8.000 à 16.000 volts, correspondant à des potentiels explosifs

de 2 à 3 millimètres entre des sphères métalliques de 1 centimètre de rayon, suffisent ordinairement pour obtenir les effets osmotiques que l'on veut étudier. Aussi peut-on utiliser un matériel très simple et de faible puissance; quelques accumulateurs et une bobine d'induction de petites dimensions. Le seul point délicat est d'obtenir un bon réglage de l'interrupteur.

Je me suis servi, pour cette étude, de filaments de *spirogyre* dont l'observation est particulièrement facile avec un grossissement moyen, sans préparation préalable. La simplicité de la structure et la dimension relativement grande des cellules permettent d'étudier très commodément les modifications que subissent ces dernières lorsqu'elles sont plongées dans les solutions osmotiques.

Je plasmolysais d'abord ces filaments par immersion dans une solution convenable d'azotate de potassium ou de saccharose. On voit ainsi le protoplasma se détacher des parois celluloliques et former une masse plus ou moins globuleuse. Si on plonge ensuite ces filaments dans l'eau pure, l'endosmose se produit très rapidement et la cellule reprend son aspect initial avant que l'on ait eu le temps de faire aucune mesure précise.

Mais, si on laisse séjourner l'algue pendant un temps suffisant dans une solution saline, solution d'azotate de potassium par exemple, le phénomène est plus complet. On observe d'abord la plasmolyse, due à l'exosmose de l'eau contenue dans les cellules; puis, après quelques instants l'endosmose du sel commence à se manifester et les cellules reprennent leur turgescence plus ou moins rapidement. Elles ne pourraient être alors plasmolysées que par une solution plus concentrée.

Le retour à la turgescence est assez lent pour que sa durée soit aisément mesurable. On peut d'ailleurs observer simultanément plusieurs filaments et obtenir un temps moyen. Mais cette mesure ne correspond plus seulement à la vitesse d'endosmose de l'eau; elle renseigne surtout sur la vitesse de diffusion du sel à travers la membrane cellulaire.

Pour observer l'action du courant étudié sur ces phénomènes, on institue deux expériences comparatives. L'expérience

témoin se fait sur une lame porte-objet ordinaire, l'expérience dans le champ du courant se fait sur une lame portant à ses extrémités des électrodes plongeant dans la solution et rattachées à l'induit de la bobine. Un potentiel explosif de 1 millimètre, correspondant à 4.830 volts, suffit pour ces expériences. La solution dans laquelle l'algue est placée doit être largement étalée à la surface de la lame, en quantité suffisante pour ne pas s'échauffer sensiblement par le passage du courant.

Dans les deux expériences on commence par effectuer la plasmolyse, dont on mesure la durée; puis, dans l'expérience témoin, on laisse l'algue revenir à la turgescence en mesurant encore la durée de ce deuxième phénomène; dans l'expérience où le courant doit intervenir, on n'établit ce dernier que lorsque la plasmolyse est complète et on mesure la durée du retour à la turgescence dans ces nouvelles conditions.

J'ai employé fréquemment, comme solution plasmolysante, la solution d'azotate de potassium à $\frac{3N}{40}$ c'est-à-dire à 3,03 p. 100.

Voici quelques résultats obtenus par cette méthode :

Titre de la solution plasmolysante NO ³ K	Expérience témoin		Expérience	
	Durée de la plasmolyse	Retour à la turgescence	Durée de la plasmolyse (sans courant)	Retour à la turgescence dans le champ électrique
3,03 p. 100	3 m.	16 m.	1 m. 45 s.	1 m.
3,03 p. 100	1 m. 10 s.	44 m. 30 s.	1 m.	7 m.
5 p. 100	1 m. 30 s.	19 m. 30 s.	2 m.	5 m.

Ces résultats concordent pour démontrer que l'action du courant abrège la durée du retour à la turgescence, donc accélère le courant endosmotique et la diffusion du sel à travers la membrane cellulaire.

Je me suis préoccupé de déterminer si l'action du courant accélérerait également la plasmolyse. Mais, dans le cas des solutions salines, qui traversent la membrane cellulaire, si l'on produit le courant dès le début de l'expérience, la plasmolyse

ne se produit pas ou commence à peine ; la diffusion du sel se produit alors trop rapidement et le phénomène d'exosmose est extrêmement fugitif.

Au contraire, avec des solutions de saccharose la plasmolyse se produit seule et il n'y a pas de retour à la turgescence ; la membrane protoplasmique est, dans ce cas, hémiperméable. On peut alors mesurer la durée du phénomène hors de toute action électrique et dans le champ du courant.

J'ai ainsi obtenu, avec des filaments de *Spirogyre* plongés dans une solution de saccharose à 10,26 p. 100 (isotonique de la solution $\frac{2N}{40}$ d'azotate de potassium).

Expérience témoin	{	Commencement de la plasmolyse après	2 m.
		Fin de la plasmolyse après	6 m.
Expérience dans le champ du courant	{	Commencement de la plasmolyse après	4 m.
		Fin de la plasmolyse après	2 m. 45 s.

L'accélération des échanges cellulaires par les courants électriques étudiés intéresse donc également le solvant et les corps dissous lorsque ces derniers peuvent traverser les membranes.

L'augmentation de vitesse osmotique du solvant est d'ailleurs tout à fait conforme aux résultats que j'avais obtenus avec les vases de PFEFFER dans l'étude physique du phénomène.

Ces expériences m'ont permis de faire également quelques remarques : 1^o Lorsqu'on fait passer le courant on observe fréquemment des mouvements d'ensemble des filaments de *Spirogyre* soumis à l'expérience. Toutefois ces mouvements ne se produisent qu'au début, ils cessent bientôt, quoique le courant continue à passer. Je pense qu'ils sont dus à des contractions protoplasmiques.

2^o Lorsque les cellules ont repris leur turgescence on peut y apercevoir de grandes vacuoles claires.

3^o Si les filaments qui sont soumis à l'action du courant sont disposés d'une façon quelconque, ceux qui reprennent le plus tôt leur turgescence sont ceux qui sont disposés transversalement par rapport au champ ; perpendiculairement aux lignes de force.

Pour faire ces différentes mesures, il est nécessaire d'assurer la constance de l'intensité lumineuse pendant l'expérience et pendant l'expérience témoin. L'action de la lumière sur les échanges osmotiques est en effet très appréciable. M. LECLERC DU

SABLON pense que cette action a pour effet d'augmenter la perméabilité des membranes; je pense qu'elle augmente aussi le pouvoir osmotique de la solution, ainsi que je l'ai dit précédemment.

Cette étude de physiologie cellulaire nous montre l'action du courant électrique sous deux aspects : 1° Accélération des échanges de solvant, qui est toujours l'eau dans le cas des êtres vivants. 2° Accélération de la diffusion des sels dissous. En réalité c'est ce dernier phénomène qui paraît le plus intéressant au point de vue de la nutrition minérale de la plante, mais le premier est loin d'être négligeable. La consommation d'eau n'est pas simplement réglée par la transpiration et l'eau n'est pas seulement le véhicule des sels.

Pour chaque atome de carbone assimilé les plantes à chlorophylle fixent une molécule d'eau pour effectuer la synthèse du glucose.

Il est donc intéressant d'étudier comment varie le régime de la circulation de cet aliment, sous l'influence des courants alternatifs de haute tension, dans le cas des plantes supérieures vasculaires.

2° ACTION DU COURANT SUR LE RÉGIME DE LA CIRCULATION DE L'EAU CHEZ LES PLANTES VASCULAIRES

Méthode d'expérimentation.

La circulation de l'eau dans les plantes vasculaires est réglée par deux phénomènes antagonistes, l'absorption et la transpiration, qui se prêtent facilement aux mesures. Il est donc possible de contrôler les échanges de liquide entre la plante et le milieu extérieur et d'observer les variations de ces échanges sous l'influence des courants électriques.

Mais, ici, le cas est beaucoup moins simple que celui de l'algue filamenteuse baignant entièrement dans le liquide; la complication tient à la structure de la plante. Indépendamment des échanges osmotiques, il y a dans ce cas des phénomènes

capillaires (circulation des liquides dans les vaisseaux continus) qui peuvent être modifiés dans un sens ou dans un autre, suivant le signe de la charge prise par le liquide et le vaisseau au contact l'un de l'autre.

L'usage des courants alternatifs permet cependant d'éliminer en partie ces phénomènes, le sens du champ changeant très rapidement d'une façon continue. Toutefois, comme le courant de rupture a une tension plus élevée, on peut craindre que son influence ne soit prépondérante; mais il suffit de renverser le sens du courant inducteur au cours d'une expérience pour constater l'identité des effets obtenus quel que soit le sens du champ du courant de rupture.

Pour effectuer mes expériences, j'ai dû d'abord déterminer un dispositif permettant de placer le végétal dans le champ du courant, sans léser aucun de ses organes essentiels.

L'expérience m'a montré la nécessité de proscrire absolument tout dispositif produisant des étincelles au contact de la plante étudiée. Il faut par conséquent que les contacts entre la plante et le circuit soient parfaits ou que l'une des électrodes soit à une telle distance que l'étincelle ne puisse jaillir sur une partie quelconque du végétal. L'étincelle ne tarderait pas en effet à carboniser la partie atteinte et la plante mourrait rapidement, fulgurée.

De mes divers essais je n'ai retenu que deux procédés : l'électrisation par contact direct et l'électrisation par l'effluve.

L'électrisation par contact direct est un procédé extrêmement commode en raison de sa simplicité. Une des électrodes plonge dans le sol ou dans le liquide nutritif sur lequel la plante est cultivée, l'autre est fixée sur la plante elle-même. Pour assurer le contact parfait de cette électrode on peut envelopper l'organe avec une légère bande de papier d'étain, ou simplement, si cela est possible, enfoncer dans cet organe une fine pointe métallique. On s'assure alors qu'il ne se produit pas d'étincelle entre la bande de papier d'étain et le végétal.

L'électrisation par effluves peut être réalisée de deux façons. Lorsque l'expérience porte sur une plante unique on peut fixer une électrode sur la plante, comme dans le cas précédent; l'autre est rattachée à une armature métallique entourant exté-

rieurement un vase isolant dans lequel est contenu le liquide de culture. Pratiquement on réalise ce dispositif au moyen d'un vase de verre entouré de papier d'étain.

S'il s'agit d'une culture comprenant un certain nombre de plantes, on plonge une électrode dans le liquide et on dispose au-dessus de la culture une lame de verre horizontale portant à sa face supérieure une armature métallique rattachée à l'autre électrode. Ce deuxième procédé a l'inconvénient de déterminer des modifications chimiques de l'atmosphère qui peuvent compliquer l'étude que l'on se propose : entre autres, une ozonisation assez rapide.

Aussi est-ce le premier dispositif que j'ai surtout employé. Ses effets sont identiques à ceux de l'électrisation par contact direct et il présente l'avantage d'éviter les phénomènes d'électrolyse. Sans doute ces phénomènes sont très faibles, l'intensité des courants employés étant elle-même très réduite ; mais il est encore préférable de les éliminer complètement.

Qu'il s'agisse de l'effluviation par ce procédé ou de l'électrisation par contact direct, une des électrodes se trouve fixée sur la plante. On peut se demander où il convient de la placer. J'ai recherché si on observait des différences dans les effets obtenus, par exemple en fixant l'électrode sur l'écorce d'une tige ou en l'enfonçant dans le bois ; dans le cas d'une tige ramifiée, en fixant une électrode unique sur un rameau ou une électrode multiple sur les diverses ramifications ; enfin en faisant varier la distance de l'électrode à la base de la tige.

J'ai ainsi trouvé que les effets obtenus sont identiques ; de faibles différences d'intensité apparaissent seulement dans les deux derniers cas : l'effet du courant est plus marqué dans le cas des électrodes multiples et dans le cas où l'électrode est plus écartée de la base de la tige. La place de l'électrode est donc à peu près indifférente ; le végétal soumis à l'expérience s'électrise facilement dans sa totalité et l'on peut, même dans le cas où l'électrode est près de la base de la tige, tirer des étincelles de l'extrémité des feuilles.

Les expériences que j'ai ainsi pu réaliser m'ont permis d'observer d'importantes variations dans le régime de la circulation de l'eau sous l'action des courants étudiés.

Variations de l'absorption:

J'ai mesuré l'absorption de rameaux, de feuilles ou de plantes entières munies de leurs racines en me servant de l'appareil classique de SACHS. Mais, au lieu d'un tube en U, je prenais une éprouvette fermée par un bouchon de caoutchouc à deux trous dont l'un donnait passage à la tige de la plante, l'autre à un tube à lumière étroite coudé horizontalement et gradué en millimètres. Si le tube est bien cylindrique, ce dont on peut s'assurer facilement, ces graduations correspondent à des volumes arbitraires, mais tous égaux, ce qui est l'essentiel puisque les mesures sont des mesures de rapports. La base de l'éprouvette était entourée d'une électrode d'étain, l'autre électrode était fixée sur le rameau.

Les expériences avaient lieu à l'obscurité; le tube étant seul éclairé par une petite lampe électrique. De cette façon la plante demeurait pendant toute l'expérience dans les mêmes conditions: on sait que les variations d'intensité lumineuse modifient profondément le régime de la circulation de l'eau dans la plante, la lumière accélérant la transpiration et l'absorption. On peut aussi opérer avec un éclairage constant.

Avec un rameau fraîchement sectionné l'absorption est d'abord très rapide, de même avec une branche détachée depuis quelque temps et partiellement fanée; mais bientôt l'absorption se régularise et la vitesse du courant devient sensiblement uniforme. On peut alors commencer les mesures. Si on opère avec des rameaux conservés quelque temps la base dans l'eau, la vitesse est uniforme dès le début.

L'expérience étant ainsi préparée et le liquide amené au bout du tube par enfoncement du bouchon, on recouvre le ménisque d'une goutte d'huile pour empêcher l'évaporation, puis on mesure au chronomètre le temps employé par ce ménisque à parcourir plusieurs espaces égaux (cinq dans la plupart de mes expériences). On détermine ensuite le temps moyen pour un espace. Une première série de mesures permet de déterminer la vitesse initiale moyenne que j'appelle V_0 . On établit ensuite le courant et on détermine de la même façon la vitesse modi-

fiée V_m . Après la suppression du courant je faisais une troisième série de mesures afin de déterminer s'il subsistait quelque trace de la modification produite et j'obtenais ainsi la vitesse post-électrique V_p . Cette dernière est intéressante à connaître comme contrôle de l'influence électrique, mais, de plus, nous verrons qu'elle fournit d'intéressantes indications sur l'état de la plante soumise à l'expérience.

Ces mesures sont faciles à faire : une loupe permet d'observer le ménisque concave au moment où sa courbe devient tangente au trait de la division ; un chronomètre permet de déterminer ce moment avec une précision suffisante.

Voici les résultats numériques détaillés que j'ai ainsi obtenus dans quelques-unes de mes expériences.

1^{re} Exp. — *Rameau de Troène* (*Ligustrum vulgare*). 29 feuilles.

Obscurité. — Température = + 17°. — E = 1 centimètre.

Espaces	Temps	Moyennes des temps
Vo. E ¹	4 m. 30 s.	4 m. 29 s.
E ²	4 m. 15 s.	
E ³	4 m. 45 s.	
E ⁴	4 m. 45 s.	
E ⁵	4 m. 40 s.	
Vm. E ¹	6 m. 35 s.	7 m. 42 s.
E ²	7 m. 15 s.	
E ³	7 m. 40 s.	
E ⁴	8 m. 10 s.	
E ⁵	8 m. 50 s.	
Vp. E ¹	7 m. 45 s.	7 m. 31 s.
E ²	7 m. 25 s.	
E ³	7 m. 35 s.	
E ⁴	7 m. 25 s.	
E ⁵	7 m. 25 s.	

$$\text{Rapport des vitesses } \frac{V_m}{V_o} = \frac{T_o}{T_m} = 0,582.$$

Cette expérience nous montre tout d'abord une diminution considérable du courant d'absorption sous l'influence du courant électrique. Ce résultat est confirmé par l'expérience suivante :

II^e Exp. — *Rameau de lilas* (*Syringa vulg.*). 16 feuilles.

Obscurité. — Température = + 17°8. — E = 1 centimètre.

Espaces	Temps	Moyennes des temps
Vo. E ¹	0 m. 55 s.	
E ²	1 m. 10 s.	
E ³	1 m. 5 s.	1 m. 6 s.
E ⁴	1 m. 5 s.	
E ⁵	1 m. 15 s.	

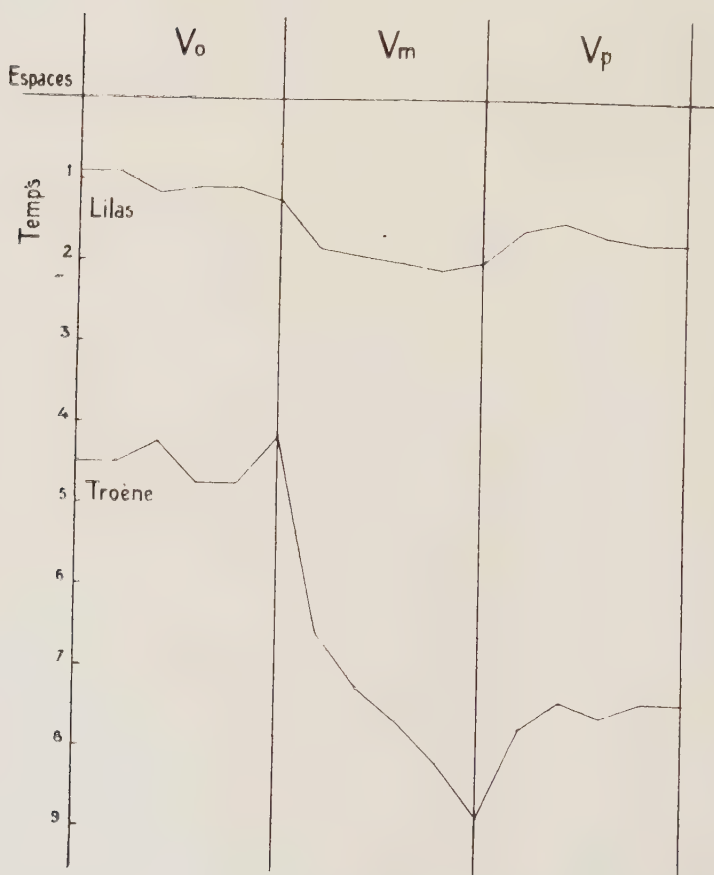


Fig. 6. — Variations de l'absorption dans le cas du Lilas et du Troène.

Vo, vitesse initiale.

Vm, vitesse modifiée par le courant.

Vp, vitesse après l'expérience.

Espaces	Temps	Moyennes des temps
<i>Vm.</i> E ¹	1 m. 50 s.	
E ²	1 m. 55 s.	
E ³	2 m.	1 m. 58 s.
E ⁴	2 m. 5 s.	
E ⁵	2 m.	
<i>Vp.</i> E ¹	1 m. 35 s.	
E ²	1 m. 30 s.	
E ³	1 m. 40 s.	1 m. 39 s.
E ⁴	1 m. 45 s.	
E ⁵	1 m. 45 s.	

$$\text{Rapport des vitesses } \frac{Vm}{Vo} = 0,559.$$

La vitesse du courant d'absorption a donc diminué presque de moitié pendant l'électrisation.

La même expérience a été répétée avec des plantes différentes (Tilleul, Fusain, Aucuba, etc.) et a donné toujours des résultats comparables.

Les conclusions qu'on en peut tirer immédiatement sont les suivantes :

1° Les courants alternatifs de haute tension ralentissent l'absorption de l'eau chez les plantes vasculaires.

2° Ce ralentissement persiste en s'atténuant après l'action électrique.

Sans me préoccuper pour l'instant d'interpréter ces résultats, je me propose d'examiner d'abord une objection que l'on pourrait faire à ma méthode.

Ces expériences sont faites avec des rameaux sectionnés, c'est-à-dire avec des plantes privées d'un de leurs principaux organes : la racine. Or, DE RUFZ DE LAVISON a montré que l'endoderme de la racine joue, pour certains sels, le rôle d'une membrane hémiperméable : l'ensemble de cette assise formerait une sorte d'osmomètre dont les vaisseaux du bois constitueraient le manomètre. On peut supposer que les résultats de l'expérience seraient différents avec des végétaux complets, munis de tous leurs organes.

Bien que les conditions des expériences précédentes soient, à ce point de vue particulier, celles où se trouvent les boutures, j'ai tenu à vérifier si la présence des racines modifiait le phéno-

mène. J'ai pris, pour cette expérience de contrôle, une petite composée, la *Lampsana communis*, que je pouvais me procurer facilement à différents états de développement. J'ai dû modifier légèrement mon appareil en revenant au tube en U de SACHS. La plante, fixée à l'extrémité d'une des branches au moyen d'un bouchon de liège fendu que je fixais au collet et que j'en-
duisais ensuite de paraffine, plongeait ses racines dans cette
branche du tube ; l'autre branche portait le tube gradué.

Les résultats de ces expériences furent les mêmes que ceux des expériences précédentes, quel que fût l'état de développement de la plante : avant, pendant ou après la floraison, l'électrisation de la plante entraîne un ralentissement de l'absorption, comme dans les rameaux séparés.

Ainsi j'ai obtenu par exemple.

Lampsana communis.

E = 1 centimètre. — Température = 18°. — Obscurité.

Vo	Temps moyen par cm.	. . .	4 m. 25 s.
Vm	»	»	7 m. 55 s.
Vp	»	»	4 m. 55 s.

C'est là un cas tout à fait normal et qui confirme les résultats précédemment énoncés. Toutefois une de ces expériences a paru donner des résultats légèrement différents et pouvant prêter à discussion. Je vais en donner le détail en transcrivant la feuille d'observations.

Lampsana communis.

Obscurité. — Température = + 19°7. — E = 1 centimètre.

Espaces	Temps	Moyenne des temps
Vo. E ¹	2 m. 5 s.	2 m.
E ²	2 m. 5 s.	
E ³	2 m.	
E ⁴	1 m. 50 s.	
E ⁵	2 m.	

Espaces	Temps	Moyenne des temps
$Vm.$ E^1	6 m.	
E^2	2 m. 25 s.	
E^3	2 m. 50 s.	3 m. 25 s.
E^4	3 m. 20 s.	
E^5	3 m. 20 s.	
$Vp.$ E^1	2 m. 45 s.	
E^2	3 m. 15 s.	
E^3	3 m. 35 s.	3 m. 38 s.
E^4	3 m. 40 s.	
E^5	4 m. 55 s.	

$$\text{Rapport } \frac{Vm}{Vo} = 0,585.$$

L'action modératrice du courant électrique apparaît ici comme dans les autres cas. Mais, si on considère seulement les temps moyens, l'absorption semble se ralentir encore après l'électrisation. Cependant si on compare les vitesses pendant les deux centimètres consécutifs

Vm	E^5	3 m. 20 s.	et
Vp	E^1	2 m. 45 s.	

on voit que l'absorption s'accélère dès que le courant électrique cesse d'agir. L'action modératrice de ce dernier apparaît encore plus évidente si on fait de même la comparaison entre

Vo	E^5	2 m.	et
Vm	E^1	6 m.	

Ces observations, relatives à une plante jeune, montrent bien une lacune de la méthode des moyennes lorsqu'il s'agit de mesurer des phénomènes passagers. Ce défaut est d'ailleurs en partie corrigé par les observations intermédiaires entre les deux observations extrêmes.

J'exposerai plus loin l'interprétation que je propose de cette apparente anomalie.

Les résultats établis par les expériences précédentes m'ont incité tout naturellement à rechercher si les courants de haute tension modifiaient aussi la transpiration des végétaux, phénomène étroitement lié à l'absorption.

Variations de la transpiration.

Dans l'expérience classique de SACHS pour la mesure indirecte de la transpiration par évaluation de la quantité d'eau

absorbée, on admet implicitement que l'absorption se règle sur la transpiration et que la quantité d'eau absorbée est égale à celle qui est évaporée dans le même temps à la surface des feuilles. Dans la plupart des cas il n'en est pas ainsi. Au contraire ces deux phénomènes diffèrent presque constamment d'intensité suivant l'état de la plante et les conditions de milieu. La lumière, par exemple, active la transpiration, même chez les plantes dépourvues de chlorophylle ; on sait d'ailleurs que cette action est beaucoup plus intense chez les plantes vertes pour lesquelles on a distingué une transpiration chlorophyllienne. Mais la lumière accélère aussi l'absorption. Cependant ces phénomènes ne varient pas dans le même rapport. Dans le cas du Troène vulgaire par exemple j'ai observé que la transpiration l'emporte sur l'absorption à la lumière et que l'inverse se produit à l'obscurité, surtout si le rameau en expérience porte des feuilles en voie de croissance. Pour le lierre c'est le contraire qui se produit : à la lumière l'absorption est plus intense que la transpiration ; tandis qu'à l'obscurité les deux phénomènes se compensent à peu près exactement. Cette constatation pourrait servir à expliquer le mécanisme des courbures phototropiques. Mais je ne retiendrai pour le moment de ces faits que la nécessité de faire les expériences à l'obscurité ou à une lumière artificielle constante, afin de maintenir l'éclairement invariable pour éliminer les variations dont il pourrait être la cause.

Pour mesurer la transpiration j'ai employé la méthode des pesées. Sur le plateau d'une balance très sensible je plaçais un vase contenant une petite quantité d'eau acidulée entourant une petite éprouvette contenant l'eau dans laquelle baignait la base du rameau. Dans l'eau acidulée plongeait une électrode formée d'un fil d'argent très fin afin que la poussée d'Archimède fut négligeable : cette électrode était maintenue par un support isolant indépendant du plateau. L'autre électrode était rattachée à la balance elle-même, laquelle reposait sur des cales isolantes : le courant était transmis au rameau par les montants de suspension du plateau.

La balance étant d'abord équilibrée au moyen d'une tare, je surchargeais de 1 décigramme par exemple, le plateau portant

le rameau, puis je mesurais le temps nécessaire au rétablissement de l'équilibre : ce temps était celui que la plante avait mis à transpirer 1 décigramme d'eau. Pour éviter les erreurs dues à l'évaporation l'eau de l'éprouvette était recouverte d'une couche d'huile.

Voici quelques résultats ainsi obtenus.

1^o *Rameau de Troène vulgaire* (23 feuilles dont 13 jeunes).

Température = + 25°5. — Eau transpirée 0 gr. 10

Vo	Temps		21 m. 25 s.
Vm	»		31 m. 35 s.
Vp	»		28 m. 50 s.

II^e Exp. — *Rameau de Troène vulg.* (37 feuilles dont 6 jeunes).

Température = + 23°. — Eau transpirée 0 gr. 10.

Vo	Temps.		14 m. 15 s.
Vm	»		17 m.
Vp	»		17 m. 45 s.

On voit par ces résultats que le courant ralentit la transpiration. Seulement, tandis que la transpiration s'accélère de nouveau après l'expérience dans le premier cas, elle se ralentit au contraire davantage dans le second. Or les deux rameaux diffèrent surtout par le nombre relatif des feuilles jeunes. On peut penser que c'est là la cause de la différence physiologique observée. C'est ce que confirme l'expérience suivante.

III^e Exp. — *Rameau de lilas vulg.* (14 feuilles adultes).

Température = + 23°2. — Eau transpirée 0 gr. 10.

Vo	Temps.		17 m. 45 s.
Vm	»		18 m. 15 s.
Vp	»		20 m. 30 s.

La persistance de l'effet du courant est encore plus sensible dans ce cas. Je reviendrai plus loin sur cette question ; pour le moment retenons simplement le résultat déjà énoncé : les

courants alternatifs de haute tension ralentissent la transpiration.

Je peux encore rapporter, à l'appui de ces observations, les deux expériences suivantes où je ne m'étais pas préoccupé de mesurer la vitesse après l'expérience, mais qui, bien que partielles, confirment les précédentes.

IV^e Exp. — *Rameau de tilleul* (8 feuilles jeunes).

Température = + 19°. — Eau transpirée = 0 gr. 02.

Vo	Temps.		4 m. 30 s.
Vm	»		5 m.

V^e Exp. — *Rameau de tilleul* (5 feuilles jeunes).

Température = + 18°. — Eau transpirée 0 gr. 04.

Vo	Temps.		5 m. 30 s.
Vm	»		12 m. 10 s.

L'électrisation diminuant l'intensité de la transpiration et celle de l'absorption, il peut être intéressant de rechercher dans quel rapport peuvent varier ces deux phénomènes, pour savoir si, en fin de compte, la plante gagne de l'eau ou en perd et si l'effet du courant est d'augmenter ou de diminuer sa turgescence.

Variations concomitantes de l'absorption et de la transpiration.

On peut se proposer dans ces recherches, soit de déterminer simplement le résultat de ces variations simultanées, soit de mesurer, pour chacun des deux phénomènes, le rapport de variation. La première de ces déterminations se fait sans difficultés ; il suffit de peser exactement la plante soumise à l'expérience et de constater, après électrisation, la variation ou la constance du poids. Il est évident qu'en opérant à l'obscurité et en limitant l'expérience à une durée relativement courte, les variations dues à l'assimilation chlorophyllienne sont supprimées et celles qui peuvent provenir de la digestion des

réserve sont réduites à de très faibles écarts. La variation de poids, si elle se produit, ne peut donc provenir que d'une imparfaite compensation de la transpiration et de l'absorption et le sens de cette variation indique immédiatement lequel de ces deux phénomènes l'emporte sur l'autre.

Le dispositif de l'expérience est des plus simples. Un fragment de tige pourvu de feuilles est d'abord exactement pesé, puis l'extrémité sectionnée de la tige est plongée dans l'eau. Au bout d'un temps déterminé variable dans chaque cas, on fait une nouvelle pesée après avoir soigneusement essuyé la partie immergée au moyen de papier buvard. On note la variation s'il y a lieu. Puis la plante est replacée dans les mêmes conditions, mais soumise à l'action du courant pendant un temps égal au précédent. Une troisième pesée indique si l'électrisation a déterminé une variation de poids et permet de comparer cette variation à celle qui a pu se produire dans la première partie de l'expérience. Il est indispensable, pour les raisons que j'ai déjà indiquées, d'opérer à l'obscurité ou à éclaircissement constant : l'obscurité complète est préférable car elle supprime la transpiration chlorophyllienne.

Voici quelques résultats obtenus par ce procédé.

1^{re} Exp. — Rameau de *Ligustrum lucidum* (6 feuilles adultes).

Obscurité. — Température = 12°4.

Poids avant l'expérience	3 gr. 10
» après 15 minutes	3 gr. 10
» après 15 minutes d'électrisation.	3 gr. 06

On voit que, dans la première partie de l'expérience, aucune variation appréciable ne s'était produite. L'action du courant détermine au contraire une perte de poids de 0 gr. 04. On peut en conclure que la transpiration l'emporte sur l'absorption, c'est donc ce dernier phénomène qui a été le plus retardé.

Dans des conditions normales il semble que le poids de la plante demeure constant à l'obscurité, donc que l'absorption se règle sur la transpiration. C'est ce que l'on peut constater en prolongeant l'expérience comme je l'ai fait pour la suivante :

Pelous.

4

II^e Exp. — Rameau de fusain (*Evonymus Japonicus*).

12 feuilles.

Obscurité. — Température = 13°.

Poids avant l'expérience	1 gr. 32
» après 15 minutes	1 gr. 32
» après 30 minutes	1 gr. 32
» après 45 minutes	1 gr. 32
» après 15 minutes d'électrisation. . . .	1 gr. 30

On voit que le poids, demeuré invariable pendant quarante-cinq minutes, a diminué de 0 gr. 02 par l'action du courant dans un intervalle de 15 minutes seulement.

Dans d'autres cas les variations obtenues sont beaucoup plus faibles, surtout s'il s'agit d'organes âgés ou de plantes à feuilles coriaces et persistantes. Dans ces cas une expérience d'une durée totale d'une heure ne révèle que des variations de l'ordre du milligramme. Mais jamais je n'ai constaté une augmentation de poids; dans tous les cas étudiés la variation était négative. L'action retardatrice du courant s'exerce donc avec plus d'intensité sur l'absorption que sur la transpiration.

Cette méthode toutefois ne permet pas une étude complète des deux phénomènes, elle permet simplement de mesurer leur différence d'intensité : si les variations propres demeuraient de même intensité, elles passeraient inaperçues car le poids de la plante ne varierait pas.

Pour compléter cette recherche, j'ai mesuré simultanément l'absorption et la transpiration et leurs variations propres sous l'influence du courant. Je me servais de l'appareil de SACHS placé sur un plateau de balance : je mesurais la transpiration par des pesées et l'absorption par le déplacement de l'eau dans le tube gradué. La deuxième de ces mesures n'était que relative, le tube ne portant que des divisions arbitraires de 1 centimètre et non une graduation en poids; elle permettait néanmoins d'établir un rapport des vitesses d'absorption, but que je me proposais; j'ai ainsi trouvé :

I^{re} Exp. — Rameau de *Troène vulgaire*.

28 feuilles dont 5 jeunes.

Obscurité. — Température = + 22°.

A. *Transpiration* : Poids d'eau transpiré = 0 gr. 10.

Temps initial (To) 17 m. 40 s. ou 1.060 s.
 Temps modifié (Tm) 21 m. 15 s. ou 1.275 s.

B. *Absorption*. E = 1 centimètre.

Temps initial 5 m. 42 s. ou 342 s.
 Temps modifié. 9 m. 11 s. ou 551 s.

Rapports.

Transpiration. . . . $\frac{Vm}{Vo} = \frac{To}{Tm} = \frac{1.060}{1.275} = 0,837$
 Absorption $\frac{Vm}{Vo} = \frac{To}{Tm} = \frac{342}{551} = 0,620.$

II^e Exp. — Rameau de *lilas*. 10 feuilles adultes.

Obscurité. — Température = + 22°.

A. *Transpiration*. Poids d'eau transpiré = 0 gr. 10.

To. 22 m 41 s. soit 1.331 s.
 Tm 22 m. 48 s. soit 1.368 s.

B. *Absorption*. E = 1 centimètre.

To. 6 m. 34 s. soit 394 s.
 Tm 16 m. 35 s. soit 995 s.

Rapports.

Transpiration . . . $\frac{Vm}{Vo} = \frac{To}{Tm} = \frac{1.331}{1.368} = 0,972$
 Absorption $\frac{Vm}{Vo} = \frac{To}{Tm} = \frac{394}{995} = 0,395.$

Les résultats de ces expériences concordent : c'est surtout l'absorption qui est ralentie par l'action des courants électri-

ques alternatifs, la transpiration subit une variation de même sens, mais beaucoup moindre. — Des expériences faites à la lumière diffuse donnent les mêmes résultats, ce qui montre que, dans ce cas particulier, il n'y a pas lieu de distinguer la transpiration chlorophyllienne de la transpiration proprement dite.

Une remarque se dégage de la comparaison de ces deux expériences. La variation de vitesse de la transpiration est plus grande dans le premier cas (Rapport = 0,837) que dans le deuxième (Rapp. = 0,972). L'inverse se produit pour l'absorption. Ce sont, il est vrai, deux plantes d'espèces différentes, mais la première possédait des feuilles jeunes qu'il manquait à la seconde. J'ai déjà observé en étudiant la transpiration des différences analogues entre les plantes jeunes et âgées et montré que la variation persistait chez ces dernières après la suppression du courant. Ces observations m'ont conduit à l'étude de l'influence de l'état de développement de la plante sur ses réactions aux courants électriques.

Influence de l'état de développement de la plante.

Je me suis servi fréquemment, au cours de cette étude, d'arbres à feuillage persistant qui présentaient un avantage capital ; c'est qu'il m'était facile de m'en procurer des rameaux en toute saison et qu'ainsi mes recherches n'étaient pas interrompues par l'hiver. De plus, à la reprise de la végétation, les jeunes pousses peuvent se distinguer facilement de celles de l'année précédente, de sorte que la distinction entre les organes jeunes et les organes âgés se trouve ainsi parfaitement concrétisée et grandement facilitée.

Pour observer comment se comportent ces organes vis-à-vis des courants électriques j'ai fait des mesures de transpiration et d'absorption. Celles-ci me paraissent les plus intéressantes : d'une réalisation plus aisée et plus rapide, elles permettent de suivre de plus près la marche des phénomènes et d'en faire une analyse plus serrée. Les mesures de transpiration, au contraire, nécessitent des pesées à intervalles réguliers, pesées dont la durée, si brève soit-elle, constitue un temps appréciable

pendant laquelle la plante est soustraite aux conditions de l'expérience. D'autre part, les variations du courant d'absorption sont plus sensibles, les mesures sont plus faciles et, partant, plus exactes.

I. — Variations de l'absorption.

A. — CAS DES ORGANES AGÉS

J'ai effectué ces expériences au moyen de rameaux ne portant que des feuilles complètement développées et dépourvus de bourgeons ou d'organes en voie de croissance. J'ai choisi pour cela des arbustes à feuilles persistantes où la transpiration et l'absorption sont facilement mesurables malgré le ralentissement de la végétation. Les espèces qui m'ont servi de sujets d'expériences sont les suivantes :

Ligustrum vulgare.

Ligustrum lucidum.

Aucuba japonica,

Hedera helix.

Cerasus lauro-cerasus.

Evonymus japonicus.

Choysia ternata.

Les résultats fournis par ces mesures peuvent être condensés dans le tableau suivant.

Les temps T_o , T_m , T_p sont les temps moyens employés par le ménisque liquide à parcourir un centimètre, avant, pendant et après l'électrisation. Ces temps ne sont comparables entre eux que dans une même expérience, la vitesse du courant d'absorption variant suivant la dimension des rameaux, le nombre de leurs feuilles et l'espèce de la plante.

	T_o	T_m	T_p
<i>Ligustrum vulg.</i>	3 m.	3 m. 48 s.	4 m. 2 s.
<i>Ligustrum lucidum.</i>	4 m. 27 s.	4 m. 31 s.	4 m. 31 s. $\frac{3}{4}$
<i>Evonymus japonicus</i>	3 m. 15 s.	4 m. 12 s.	4 m. 33 s.
<i>Cerasus laurocerasus</i>	3 m. 22 s.	3 m. 23 s.	3 m. 30 s.
<i>Aucuba japonica.</i>	5 m. 37 s.	5 m. 57 s.	6 m. 10 s.
<i>Choysia ternata</i>	3 m. 5 s.	3 m. 20 s.	3 m. 25 s.
<i>Hedera helix.</i>	2 m. 23 s.	3 m. 30 s.	5 m. 25 s.

L'examen de ces sept cas fait immédiatement apparaître une particularité qui leur est commune ; c'est que la variation déterminée par le courant persiste et même s'accroît après l'électrisation. Très faible dans le cas du Troène luisant, cette accretion est au contraire considérable dans le cas du lierre.

Quant à la variation immédiate, elle est très inégale suivant les cas. Le Troène luisant et le laurier-cerise sont ceux qui montrent la plus faible, et, si les mesures avaient porté seulement sur la première de ces espèces, on aurait pu attribuer à des erreurs d'expérience les différences observées. Il est à remarquer que ces deux plantes ont des feuilles munies d'une forte cuticule.

B. CAS DES ORGANES JEUNES

Pour que la comparaison entre le cas des organes jeunes et celui des organes âgés fût aussi significative que possible, j'avais soin de prélever sur la même plante les deux échantillons comparés : jeunes pousses et branches de l'année précédente. — Les mesures faites dans les mêmes conditions me fournirent les résultats suivants :

	<u>To</u>	<u>Tm</u>	<u>Tp</u>
<i>Ligustrum vulg.</i>	2 m. 31 s.	2 m. 56 s.	2 m. 45 s.
<i>Ligustrum lucidum</i> . . .	3 m. 57 s.	13 m. 20 s.	9 m. 10 s.
<i>Evonymus japonicus</i> . . .	3 m. 39 s.	13 m. 35 s.	6 m. 55 s.
<i>Cerasus laurocerasus</i> . . .	1 m. 43 s.	2 m. 31 s.	2 m. 16 s.
<i>Aucuba Japonica</i>	4 m. 15 s.	16 m. 50 s.	10 m. 20 s.
<i>Choysia ternata</i>	6 m. 12 s.	7 m. 55 s.	7 m. 25 s.
<i>Hedera helix</i>	1 m. 32 s.	2 m. 55 s.	2 m. 42 s.

Les conclusions qu'on en peut tirer opposent nettement les organes jeunes aux organes âgés. Ici la variation produite par le courant est très appréciable et beaucoup plus grande que dans les cas correspondants du tableau précédent. Le troène luisant et le laurier-cerise se comportent comme les autres espèces et la variation est nette. Si on calcule la valeur du rapport $\frac{V_m}{V_o}$ pour deux cas correspondants des deux tableaux, soit par exemple le fusain, on a :

$$\begin{aligned}\frac{Vm}{Vo} &= \frac{3 \text{ m. } 45 \text{ s.}}{4 \text{ m. } 42 \text{ s.}} = \frac{495}{252} = 0,773 \text{ pour les organes âgés} \\ &= \frac{3 \text{ m. } 39 \text{ s.}}{13 \text{ m. } 35 \text{ s.}} = \frac{219}{815} = 0,268 \text{ pour les organes jeunes.}\end{aligned}$$

D'autre part, la variation déterminée, loin de s'accroître après la suppression du courant, persiste, il est vrai, mais en s'atténuant et en tendant à disparaître. On peut donc conclure en résumé que : la variation du courant d'absorption déterminée par l'électrisation est faible et persistante dans les organes âgés, plus grande et temporaire dans les organes jeunes.

Ces résultats, qui distinguent les deux états de la plante au point de vue de ses réactions aux courants électriques, sont confirmés par l'étude de la transpiration.

II. — Variations de la transpiration.

A. — CAS DES ORGANES AGÉS

Ces mesures étaient faites par la méthode des pesées à l'aide d'une balance très sensible. Leur réalisation en est fort délicate à cause des variations de poids extrêmement faibles qui se produisent, ce qui oblige parfois à prolonger l'expérience assez longtemps pour que ces variations deviennent appréciables. Voici quelques résultats ainsi obtenus. Les quantités d'eau Q_0 , Q_m , Q_p transpirées avant, pendant et après l'électrisation mesurent l'intensité du phénomène pendant des temps égaux pour chaque expérience, mais variables d'une expérience à l'autre, et dont j'indique la durée dans la dernière colonne du tableau en regard des résultats.

	Q_0	Q_m	Q_p	Temps
Ligustrum vulg.	0 gr. 055	0,044	0,042	15 m.
Evonymus jap.	0 gr. 040	0,039	0,037	15 m.
Cerasus laurocerasus	0 gr. 170	0,090	0,090	10 m.
Aucuba jap.	0 gr. 050	0,030	0,030	10 m.
Choysia ternata	0 gr. 010	0,008	0,007	30 m.

On voit que la transpiration est faiblement ralentie dans la plupart des cas et que ce ralentissement persiste après l'électrisation et parfois s'accroît.

B. — CAS DES ORGANES JEUNES

L'étude du cas des organes jeunes fournit des résultats concordants. La transpiration est ralentie pendant l'électrisation d'une façon beaucoup plus appréciable que dans les organes âgés, mais ce ralentissement n'est que temporaire et l'émission de vapeur d'eau devient plus grande dès que l'on cesse d'électriser le rameau.

J'ai ainsi trouvé :

	<u>Qo</u>	<u>Qm</u>	<u>Qp</u>	<u>Temps</u>
Ligustrum vulg.	0 gr. 035	0,024	0,028	15 m.
Evonymus jap.	0 gr. 060	0,035	0,050	15 m.
»	0 gr. 040	0,020	0,035	15 m.
Cerasus laurus	0 gr. 038	0,026	0,030	15 m.
Aucuba jap.	0 gr. 045	0,035	0,040	15 m.
Choysia tern.	0 gr. 025	0,016	0,019	30 m.

On peut rapprocher de ces résultats ceux que j'ai cités précédemment et qui m'ont conduit, par l'observation des différences que présentaient dans leurs réactions des rameaux comportant un nombre variable de feuilles jeunes, à rechercher l'influence de l'état de développement. Je rappelle les nombres obtenus dans ces expériences où la quantité d'eau transpirée était fixe (0 gr. 10) et où je mesurais le temps nécessaire à sa transpiration.

	<u>To</u>	<u>Tm</u>	<u>Tp</u>
Lilas vulg. (14 feuilles âgées) . .	17 m. 45 s.	18 m. 15 s.	20 m. 30 s.
Troène vulg. (37 f. dont 6 jeunes) .	14 m. 15 s.	17 m.	17 m. 45 s.
» (23 f. dont 15 jeunes) .	21 m. 25 s.	31 m. 35 s.	28 m. 50 s.

On voit que dans ces trois cas les réactions de la plante dépendent de la présence ou de l'absence des feuilles jeunes et de leur nombre relatif. En somme les conclusions que nous a fournies l'étude de l'absorption sont également applicables à la transpiration.

Phénomènes osmotiques dans les plantes vasculaires.

Les recherches physiques dont j'ai exposé précédemment les résultats m'ont permis de démontrer qu'un osmomètre placé dans un champ électrique alternatif, devenait le siège d'échan-

ges osmotiques accélérés ; les cellules de la *Spirogyre*, fonctionnant comme des osmomètres, présentent, dans les mêmes conditions, des phénomènes semblables. On aurait pu penser *a priori* que les plantes vasculaires, dans le champ du courant, présenteraient une accélération du courant d'absorption qui traduirait l'accélération de leurs échanges osmotiques. Le fait que c'est le contraire qui se produit et que le régime de la circulation de l'eau accuse une diminution d'intensité sous l'influence de l'électrisation, montre que ce serait là un schéma du phénomène beaucoup trop simple, sinon entièrement faux. Il n'est pas possible de mettre en doute que les échanges osmotiques cellulaires soient modifiés de la même façon dans les plantes vasculaires et dans le vase de PFEFFER : l'exemple de la *Spirogyre* viendrait lever ce doute si on pouvait le concevoir.

Il faut donc conclure à une indépendance relative de ces phénomènes osmotiques et du régime de la circulation de l'eau.

La plante vasculaire soumise à l'action des courants de haute tension, se trouve bien en effet dans des conditions comparables à celle de la *Spirogyre* et de l'osmomètre. J'ai dit précédemment que, quel que fût le point de contact de l'électrode, la plante s'électrisait en totalité. Il se produit en effet à ce point de contact de rapides variations de potentiel qui se transmettent de proche en proche aux cellules voisines par le jeu de l'influence électrique. Ainsi chaque cellule se trouve, dans un temps très court, soumise à des variations qui déterminent un continu et rapide renversement des pôles développés par l'induction. Cette action crée, dans la cellule même, un champ électrique alternatif dont les effets osmotiques nous sont connus.

Il est évident que l'action d'un courant continu serait complètement différente ; le champ se trouverait limité à l'intervalle compris entre les deux électrodes, et son action se traduirait principalement par des phénomènes d'électrolyse ou d'électrophorèse.

Cherchons à établir un schéma osmotique de la plante vasculaire. Il est inutile de considérer l'anatomie particulière de chaque organe, les phénomènes qu'il s'agit d'étudier n'en dépendant pas directement. Nous avons vu notamment que les

expériences qui ont porté sur des plantes complètes ont donné les mêmes résultats que celles qui ont été faites avec des rameaux sectionnés.

Quel que soit le rôle de la racine dans la nutrition de la plante, sa présence n'est pas indispensable et les boutures végètent assez longtemps sans son aide, jusqu'à l'apparition des racines adventives.

Nous considérerons donc dans le végétal vasculaire deux parties essentielles :

1° les éléments cellulaires vivants qui réalisent de minuscules osmomètres complètement clos ;

2° les cavités intercellulaires qui ne sont que des dépendances du milieu extérieur.

Les éléments vasculaires qui assurent la circulation des liquides se rangent dans ces deux groupes : dans le premier les éléments du liber, cellules et tubes criblés ; dans le deuxième les vaisseaux du bois, éléments morts, comparables aux lacunes intercellulaires.

La plante se trouve ainsi ramenée au schéma suivant : de nombreux osmomètres clos enfermés dans un vase commun plein de liquide qui est une solution diluée de sels minéraux et de substances organiques, et dont le solvant, l'eau, est renouvelé par la transpiration et l'absorption.

Cependant ce schéma doit être quelque peu modifié suivant l'âge de l'organe considéré ; les caractères des tissus se modifiant au cours de leur évolution.

Dans les organes jeunes, les bourgeons par exemple, le tissu est un méristème dont toutes les cellules sont en contact étroit les unes avec les autres, sans interposition de lacunes. Leur membrane, entièrement protoplasmique au début, est par conséquent assez extensible et peut se déformer facilement sous la poussée osmotique du contenu. Leur protoplasma ne présente pas encore de vacuoles, ce qui ne signifie pas que le suc cellulaire fasse absolument défaut ; il est probable au contraire qu'il existe déjà sous forme de très petites inclusions ou à l'état de mélange intime avec les colloïdes protoplasmiques. En somme les caractères essentiels des organes jeunes sont les suivants : 1° absence de lacunes intercellulaires, 2° absence de

membrane cellulosique rigide, 3° absence de vacuoles intracellulaires. Ces caractères n'ont pas d'ailleurs une valeur absolue ; il y a toutes sortes d'états de transition entre le début et la fin du développement et les caractères s'atténuent au cours de cette évolution.

Dans les organes âgés au contraire, la structure est tout à fait différente. Au méristème initial ont succédé des tissus plus ou moins différenciés. Le moins différencié, le parenchyme, présente de nombreuses lacunes séparant les cellules qui prennent souvent une forme sphérique au lieu de la forme polyédrique primitive. Le tissu vasculaire ligneux, formé de cellules mortes, constitue en somme un système de lacunes. Quant aux cellules vivantes elles-mêmes, leur membrane cellulosique est complètement formée et donne à la membrane protoplasmique un appui rigide faiblement déformable, parfois même complètement indéformable lorsque la cellulose est lignifiée ou minéralisée. Le suc cellulaire est devenu très abondant et constitue de larges vacuoles qui confluent parfois en une seule.

Les caractères sont donc ici : 1° parenchyme lacuneux, 2° membrane inextensible, 3° suc cellulaire abondant.

Quel peut être, dans ces cas, l'effet d'une accélération d'échanges osmotiques produite par les courants électriques. Considérons le schéma général et occupons-nous seulement des échanges d'eau. Le suc cellulaire est hypertonique par rapport au liquide des lacunes. Une accélération du courant d'endosmose aura pour effet de faire passer dans les cellules l'eau des lacunes sans que le volume total change. Si les cellules sont extensibles, leur turgescence aura pour effet, en augmentant leur volume, de diminuer le volume total des lacunes, ce qui pourra entraîner un ralentissement de la circulation de l'eau dans ces cavités. Si elles sont rigides, une faible endosmose portera leur pression osmotique à sa valeur limite et le régime de la circulation ne sera pas sensiblement changé.

Ainsi, un ralentissement de la circulation serait la conséquence possible d'une absorption cellulaire plus intense : les deux phénomènes sont donc relativement indépendants.

Cette explication peut s'adapter sans difficultés au cas des organes âgés ; le faible ralentissement de la circulation qu'ils

subissent pouvant être attribué à une certaine extensibilité des membranes cellulosesiques et à l'oblitération des lacunes : la persistance de l'effet produit serait due à la présence d'électrolytes dans leur suc cellulaire.

Mais il n'en va pas de même pour les organes jeunes. Si les membranes cellulaires y sont plus déformables, par contre les lacunes sont plus rares. La variation devrait être plus faible, à l'encontre de ce qui se produit. Comme les échanges osmotiques se font surtout de cellule à cellule, on comprendrait mieux, dans le cas d'un méristème compact, qu'une accélération de l'endosmose entraînât une accélération parallèle du courant d'absorption.

La solution de cette difficulté m'est apparue au cours d'expériences de plasmolyse d'organes de plantes vasculaires : la cause la plus importante des variations observées est la contractilité protoplasmique.

Expériences de plasmolyse chez les plantes vasculaires.

J'ai exposé précédemment comment les phénomènes de plasmolyse m'ont permis d'étudier les échanges osmotiques dans la Spirogyre. J'ai pensé appliquer la même méthode aux plantes supérieures, mais en variant le dispositif qui permettait d'observer les phénomènes de plasmolyse et de turgescence.

On sait que des organes comme des tiges, des racines, des pétioles ou des pédoncules floraux, subissent, lorsqu'ils sont plasmolysés, un raccourcissement appréciable, lorsqu'il s'agit de plantes herbacées ou d'organes jeunes de plantes ligneuses dans lesquels le stéréome est encore peu développé. Si ces organes, plasmolysés par une solution hypertonique, sont ensuite plongés dans l'eau pure ou dans une solution hypotonique, ils reprennent leur longueur primitive par retour à la turgescence des cellules constitutantes. Il y a là un moyen très commode de constater si le retour à la turgescence est hâté par les courants alternatifs comme dans le cas des cellules de Spirogyre.

Pour faciliter l'observation de ces variations de longueur,

j'ai construit un appareil très simple qui permettait de les amplifier à volonté, l'organe en expérience mettant lui-même en mouvement un levier très léger à bras inégaux, formant aiguille indicatrice.

L'organe était placé dans un tube de verre vertical fermé à sa partie inférieure par un bouchon de liège; il était fixé au bouchon par un fil de soie ou d'argent (on peut employer d'ailleurs toute autre substance non hygrométrique). L'autre extrémité de cet organe était rattachée de même au petit bras de levier de l'aiguille dont les déplacements pouvaient être observés au moyen d'un cercle gradué. Le tube pouvait être rempli, soit d'eau, soit d'une solution plasmolysante. Un tube à robinet, traversant le bouchon inférieur, permettait de même de faire écouler ces liquides.

Pour étudier l'action du courant on dispose deux électrodes, l'une à la partie inférieure du tube, l'autre à la partie supérieure : la première peut être le fil de fixation de l'organe si l'on emploie un fil métallique. Dans l'appareil que j'ai ainsi construit le rapport des bras de levier était de $1/60$.

Pour faire l'expérience on plasmolyse d'abord l'organe, puis, lorsque l'aiguille se fixe sur un point du cercle gradué, on laisse écouler la solution plasmolysante que l'on remplace par de l'eau distillée. On observe alors le mouvement en sens inverse de l'aiguille et on évalue le temps qu'elle met à parcourir un degré. Produisant ensuite le courant on fait la même mesure. Après la suppression du courant on effectue la mesure de la vitesse post-électrique d'allongement. Chacune de ces mesures était la moyenne de cinq observations consécutives.

J'ai d'abord réalisé cette expérience avec des organes que j'avais prélevés à l'avance et longuement plasmolysés avec une solution d'azotate de potassium. Dans ces conditions les résultats furent bien ceux que je pensais obtenir; la vitesse d'allongement se trouvait accrue par le courant électrique et cet accroissement persistait après la suppression du courant, en s'atténuant progressivement. Ainsi, avec un pétiole de feuille de *lierre* j'ai obtenu :

	Espaces (degrés)	Temps	Moyenne des temps
Vo	d^1	1 m.	0 m. 57 s.
	d^2	1 m.	
	d^3	1 m.	
	d^4	0 m. 35 s.	
	d^5	0 m. 50 s.	
Vm	d^1	0 m. 30 s.	0 m. 27 s.
	d^2	0 m. 30 s.	
	d^3	0 m. 25 s.	
	d^4	0 m. 25 s.	
	d^5	0 m. 25 s.	
Vp	d^1	0 m. 30 s.	0 m. 37 s.
	d^2	0 m. 35 s.	
	d^3	0 m. 35 s.	
	d^4	0 m. 40 s.	
	d^5	0 m. 45 s.	
Vp (2 ^e mesure) $5d$.		4 m. 35 s.	Moyenne par degré 0 m. 55 s.

On peut obtenir des résultats analogues avec d'autres plantes, toutes les fois que la plasmolyse a été très prolongée ou que les organes ont été prélevés quelques heures à l'avance. On peut aussi les observer en plasmolysant ces organes avec de l'alcool. Or, dans tous ces cas, les organes sont morts et les cellules ne se comportent plus que comme des osmomètres inertes.

Il en est tout autrement si on se sert d'organes vivants, fraîchement prélevés, dont on ne pousse la plasmolyse que jusqu'au point nécessaire pour observer un raccourcissement suffisant. Dans ce cas, dès l'établissement du courant, on observe, suivant l'organe considéré, soit un arrêt immédiat de l'allongement, soit même un raccourcissement extrêmement sensible. L'ampleur de ce raccourcissement est variable; l'exemple qui m'a fourni le plus intense est le pédoncule de l'inflorescence de la pâquerette commune (*Bellis perennis*). Dans ce cas, l'aiguille indicatrice de mon appareil accusait en quelques secondes une déviation qui pouvait atteindre 60 degrés.

Ce raccourcissement n'est pas dû à une plasmolyse; mais à une contraction d'ensemble de l'organe, due elle-même à la contraction du protoplasma des cellules constitutantes. En effet on peut reproduire le phénomène hors de tout liquide et sans plasmolyse préalable. Il est à remarquer que cette contraction est définitive : l'organe ne s'allonge plus après la suppression

du courant : l'organe est mort. Les pédoncules floraux ainsi traités se flétrissent et noircissent mais seulement entre les points de contact des deux électrodes, si l'électrisation n'a été que partielle. Il est vrai que l'organe ainsi isolé est voué à une mort rapide que l'action du courant ne fait peut-être que hâter.

Aucun effet de même nature ne peut être observé si l'on emploie, au lieu de courants alternatifs de haute tension et de basse fréquence, soit des courants de haute fréquence, soit des courants continus de faible tension. Dans ces deux cas il n'y a pas de contraction.

Cette sensibilité électrique se retrouve, plus ou moins atténuée, dans beaucoup d'autres organes végétaux : très faible dans les racines du *Poa pratensis*, elle est assez sensible dans le pétiole de la feuille de lierre. Il est probable qu'elle existe dans toutes les cellules, mais la contraction très faible qu'elle produit est pratiquement inappréciable au microscope de même que les variations de turgescence des cellules qui n'ont pas été préalablement plasmolysées.

Cette contraction peut suffire à expliquer les variations observées dans le régime de la circulation de l'eau. M. LECLERC DU SABLON a montré en effet que la contraction protoplasmique provoquée par les vapeurs anesthésiques d'éther ou de chloroforme entraînerait une diminution de la transpiration. Ce n'est que par une action prolongée de ces vapeurs que la transpiration s'accélère et prend même une intensité plus grande que l'intensité primitive, comme l'avait montré JUELLE, parce que, à ce moment, la plante est intoxiquée et les membranes protoplasmiques deviennent plus perméables. La contraction provoquée par les courants électriques peut sans doute produire les mêmes effets que celle que provoquent les anesthésiques. En diminuant la perméabilité des membranes et la surface extérieure des cellules, elle ralentit les échanges d'eau entre ces dernières et le milieu extérieur, ce qui se traduit par une diminution de l'absorption et de la transpiration. Dans cette hypothèse les différences observées entre les organes âgés et les organes jeunes s'expliquent aisément : elles sont les conséquences des différences anatomiques et surtout histologiques. Rien ne gêne la contraction des cellules jeunes dont la mem-

brane est simplement protoplasmique et dont le suc cellulaire est peu abondant, aussi cette contraction est intense et rapide mais passagère, et la cellule reprend assez vite son état normal lorsque l'action du courant cesse de se faire sentir et lorsqu'elle n'a pas été trop intense ou trop prolongée. Les cellules âgées, au contraire, dont le protoplasma se réduit souvent à une mince couche périphérique enveloppant une énorme vacuole, sont moins contractiles et moins libres dans leur contraction. Cette contraction serait donc lente, durable et assez faible. Elle se continuerait quelque temps après la suppression du courant. Elle doit produire un léger décollement de la membrane protoplasmique et de la membrane cellulosique.

Le ralentissement de la circulation de l'eau serait dû au mécanisme suivant : la contraction ne peut se produire qu'à condition qu'il y ait en même temps exosmose d'une certaine quantité d'eau, puisque les liquides sont pratiquement incompressibles. Cette eau reflue dans le système de lacunes qu'elle emplit, ce qui ralentit ainsi l'absorption. D'autre part, la transpiration qui se produit à la surface de la cellule se trouve diminuée par la réduction de cette surface et par la pellicule d'eau qui la revêt : l'émission d'eau qui se produit alors est surtout due à l'évaporation dans le système de lacunes qui communique avec l'extérieur par les stomates.

Nous avons vu précédemment que la diminution d'absorption était plus considérable que celle de la transpiration. Or la plante, qui perd de l'eau, ne perd cependant pas sa turgescence. La contraction d'ensemble qui résulte de l'addition de toutes les contractions cellulaires suffit à expliquer cette particularité.

La contraction paraît donc jouer un grand rôle dans les phénomènes observés en venant troubler le jeu normal des phénomènes osmotiques. Dans quelle mesure cette contraction elle-même est-elle un phénomène osmotique ; ceci est un problème d'ordre plus général, le problème de la contractilité protoplasmique. Il est probable que l'osmose joue un grand rôle dans la contraction du protoplasma, mais elle ne suffit pas à l'expliquer puisque cette contraction entraîne des transformations d'énergie chimique en énergie mécanique.

Peut-on attribuer à la contraction toutes les variations observées dans le régime de la circulation de l'eau ? C'est cette question que j'ai essayé de résoudre par l'emploi des courants de haute fréquence.

Effets des courants de haute fréquence.

On sait que les décharges oscillantes de haute fréquence possèdent, entre autres propriétés physiologiques intéressantes, celle de ne pas provoquer la contraction musculaire et de n'exciter que très faiblement, même à potentiel élevé, le système nerveux périphérique. Leur action, presque négligeable sur les éléments cellulaires spécialisés dont la contractilité est la propriété essentielle, est pratiquement nulle sur des cellules dont le protoplasma n'a subi aucune différenciation et ne possède qu'une sensibilité diffuse, comme c'est le cas pour la plupart des cellules végétales. Ainsi, même avec le pédoncule floral de *Bellis perennis*, ces courants ne provoquent aucune contraction appréciable. J'ai observé d'autre part que leur action sur les phénomènes osmotiques était qualitativement la même que celle des courants alternatifs de basse fréquence, tels que ceux que l'on obtient aux bornes d'une bobine d'induction. Leur emploi constitue donc un moyen de déterminer la part qui revient, dans les variations du régime de la circulation de l'eau, à la contraction cellulaire. Cette part est prépondérante.

J'ai ainsi mesuré les variations de l'absorption dans des rameaux de Troène (Lig. vulgare et Lig. lucidum), portant un grand nombre de jeunes pousses et de feuilles en voie de développement. J'ai obtenu :

	T_o	T_m
Ligustrum vulgare.	1 m. 18 s. 1/3	1 m. 27 s. 1/2
Ligustrum lucidum.	4 m. 49 s.	5 m. 8 s.

On voit que le ralentissement de l'absorption est moindre que celui que j'avais obtenu avec les courants de basse fréquence. Le rapport des vitesses qui était dans ce cas de 0,837 pour le troène vulgaire, passe à 0,896. La différence est

encore plus sensible pour le cas du troène luisant où le rapport passe de 0,296 à 0,938.

Il n'en demeure pas moins une variation négative due à l'action du courant. Mais si on répète la même expérience avec des rameaux âgés, cette variation disparaît complètement. Ainsi un rameau de troène luisant dépourvu d'organes jeunes, montrait une absorption parfaitement régulière et les temps mesurés se maintenaient à 3 m. 30 s. avec une constance remarquable, que la plante fût ou non soumise aux décharges de haute fréquence. Je pense que la légère variation observée dans les organes jeunes est encore due à une faible contraction. Les décharges oscillantes qui parcourent le circuit réunissant les armatures des condensateurs ne sont pas, en effet, toutes de la même fréquence et il se produit souvent dans ce circuit des oscillations parasites de fréquence très basse qu'il est presque impossible d'éviter. Ce sont elles qui sont sans doute la cause de la légère contraction des cellules jeunes. Au contraire, les cellules âgées, moins contractiles, n'en sont pas affectées et toute variation disparaît. Cependant le courant modifie les phénomènes osmotiques, ainsi que je l'ai indiqué. Si le régime de l'absorption ne s'en trouve pas modifié, c'est que les deux phénomènes ne dépendent pas directement l'un de l'autre, comme je l'ai exposé précédemment.

*Contrôle de l'influence de la contraction protoplasmique
sur le courant d'absorption.*

On peut mettre en évidence d'une manière très simple le rôle de la contraction protoplasmique, provoquée par le courant électrique, dans le ralentissement de l'absorption. Il suffit d'observer l'ascension d'un liquide coloré dans les nervures d'une feuille. Une solution d'éosine convient parfaitement pour cette expérience. Grâce à la translucidité du limbe, on peut voir le liquide pénétrer les nervures et on peut suivre à tout instant sa répartition.

On institue une expérience comparative avec deux feuilles prélevées sur la même branche simultanément et aussi semblables que possible. L'une d'elles sert de témoin : son pétiole

plonge dans une solution aqueuse d'éosine fortement colorée. L'autre feuille est disposée de même façon, mais l'extrémité de

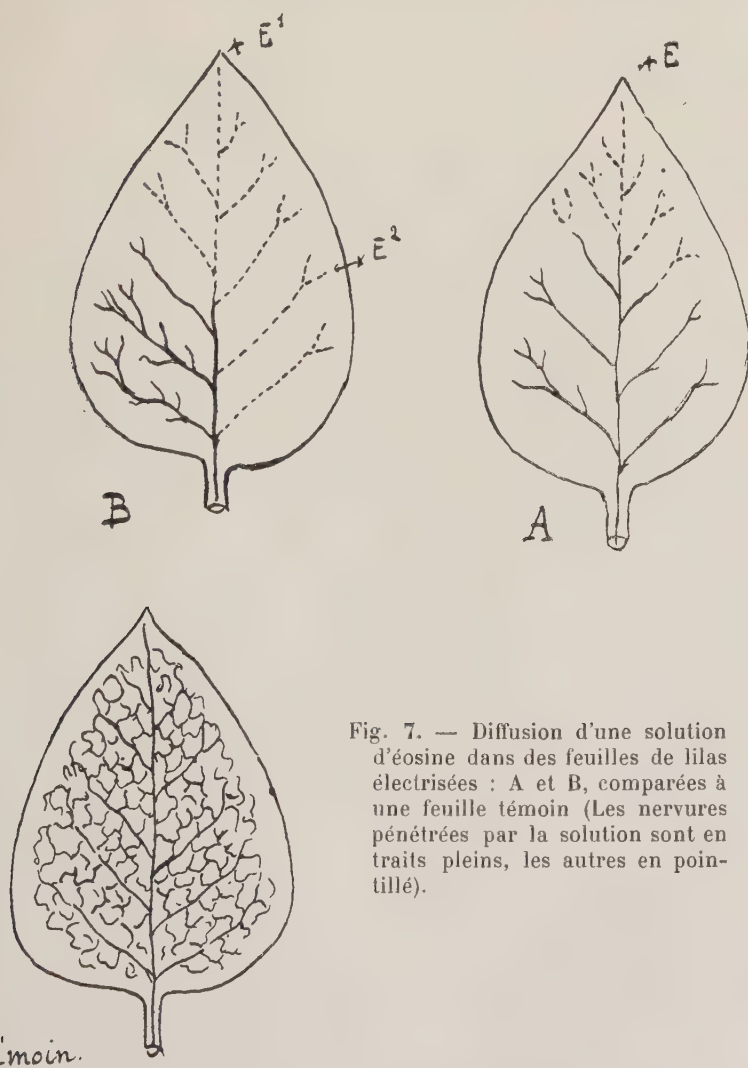


Fig. 7. — Diffusion d'une solution d'éosine dans des feuilles de lilas électrisées : A et B, comparées à une feuille témoin (Les nervures pénétrées par la solution sont en traits pleins, les autres en pointillé).

la nervure principale est mise en contact avec une électrode correspondant à l'un des pôles d'une bobine d'induction ; l'autre pôle correspond avec une autre électrode qui entoure l'éprou-

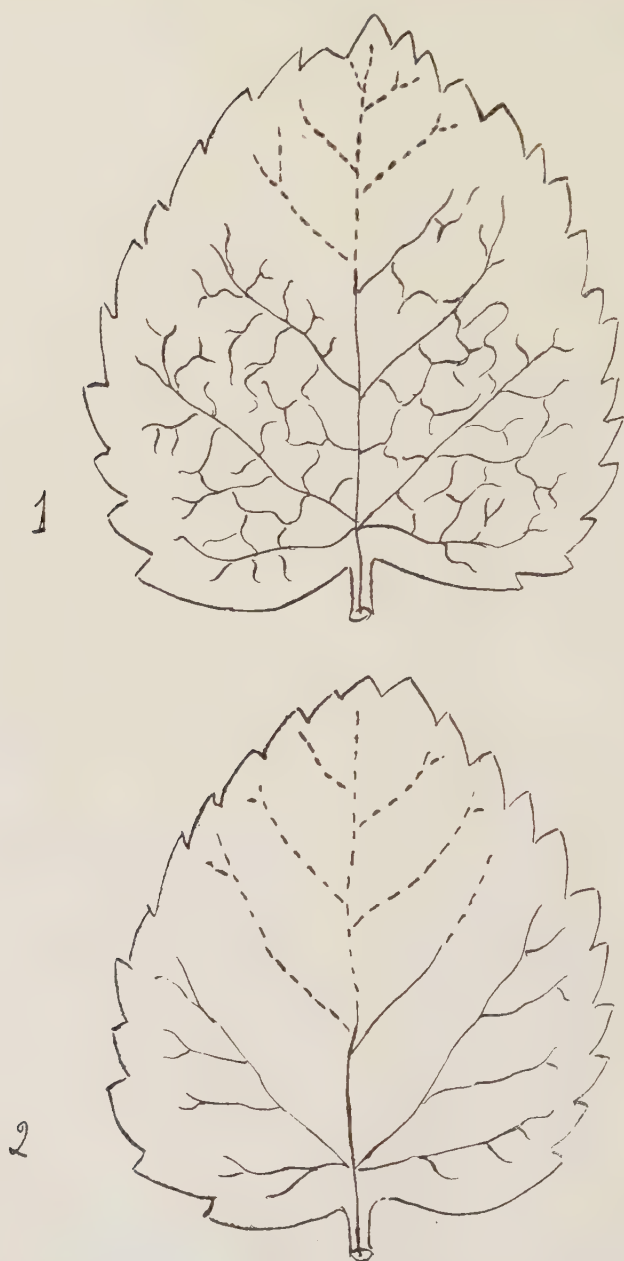


Fig. 8. -- Diffusion d'une solution d'éosine dans des feuilles de tilleul (1 soumise à des courants de haute fréquence, 2 feuille témoin). Durée de l'expérience : trente minutes.

vette contenant le liquide. On peut aussi faire plonger directement dans le liquide cette dernière électrode, mais il arrive alors fréquemment que le courant trop intense détermine dans les cellules des modifications chimiques qui se traduisent par un noircissement des tissus le long de la nervure principale. Le premier procédé paraît donc préférable. Je me servais pour ces expériences de feuilles de lilas ou de tilleul.

La figure ci-contre, montre le résultat de ces expériences. Dans le témoin, on aperçoit au bout de vingt minutes environ le liquide coloré qui s'est répandu jusque dans les nervures de troisième ordre, d'une façon sensiblement uniforme sur tout l'ensemble du limbe. Dans la feuille A, soumise à l'action du courant suivant le procédé indiqué, la première électrode étant appliquée en E au sommet, le liquide n'a pénétré pendant le même temps qu'une partie de la nervure principale et les premières nervures secondaires à partir de la base ; dans quelques cas, on voit même l'éosine se répandre dans les premières ramifications de la nervure principale plus rapidement dans la feuille en expérience que dans la feuille témoin. La contraction cellulaire paraît surtout intense sur le trajet direct du courant, les parties latérales de la feuille semblent y échapper ou en être moins affectées. Mais si, comme dans le cas de la feuille B, on établit le courant par une double électrode en contact avec le limbe aux points E_1 et E_2 , l'autre pôle aboutissant toujours au liquide ; le ralentissement de l'absorption peut également être observé dans la partie latérale qui est en contact avec l'électrode E^2 . Le liquide coloré se répand alors dans les nervures secondaires de la partie symétrique.

On peut répéter l'expérience avec des rameaux semblables, portant un même nombre de feuilles et constater les mêmes résultats. Le rameau soumis à l'action du courant montre une absorption très ralentie, tandis que les feuilles du rameau témoin sont assez rapidement pénétrées par l'éosine.

J'ai étudié de la même façon l'action des courants de haute fréquence. Dans la plupart des cas leur action paraît négligeable, la marche de l'absorption est la même dans la feuille électrisée et dans la feuille témoin. Dans quelques cas cependant, le courant d'absorption paraît accéléré par l'action électrique.

Cette accélération est le plus souvent très faible ; elle s'est montrée très sensible dans le cas de feuilles de tilleul et de rameaux de lilas. Elle est toutefois moins constante que le ralentissement dû aux courants de basse fréquence. En tout cas l'action des courants de haute fréquence, lorsqu'ils ne comportent pas d'oscillations parasites de fréquence plus basse, ne provoque aucune contraction cellulaire et ne ralentit pas l'absorption ; fait important que les mesures précédemment rapportées avaient déjà démontré.

RÉSUMÉ GÉNÉRAL DES OBSERVATIONS

En résumé, l'action des courants alternatifs de haute tension détermine sur les végétaux les effets suivants.

1° Accélération des échanges osmotiques cellulaires (échanges d'eau et de substances dissoutes).

2° Ralentissement de l'absorption de l'eau chez les plantes vasculaires. — Variation faible et persistante dans les organes âgés ; plus forte et temporaire dans les organes jeunes.

3° Ralentissement de la transpiration, également faible et persistant dans les organes âgés, fort et temporaire dans les organes jeunes.

4° L'absorption est plus ralentie que la transpiration ; la plante subit donc une perte d'eau, sans que sa turgescence en paraisse diminuée.

5° Les organes morts se comportent, vis-à-vis de l'action électrique, comme des osmomètres inertes ; les organes vivants présentent une contraction protoplasmique, réaction propre qui détermine le ralentissement observé.

6° Les courants de haute fréquence ne produisent pas de contraction dans les organes âgés ; ils produisent une contraction légère dans les organes jeunes. Dans le premier cas, l'absorption n'est pas ralentie et peut même être accélérée.

CONCLUSIONS

De l'ensemble des résultats précédents cherchons maintenant à tirer quelques conclusions pratiques qui permettent de comprendre les effets produits, par les courants de haute tension, sur les végétaux et qui pourront servir de guides dans les recherches d'électroculture.

Les effets de ces courants sont doubles : d'une part, ils déterminent une accélération des échanges osmotiques et par conséquent semblent devoir favoriser la nutrition minérale de la cellule : il y a, dans ce cas, identité complète avec les phénomènes que j'ai observés au moyen des membranes osmotiques de PFEFFER.

D'autre part, ils provoquent dans le protoplasma des cellules vivantes une rupture d'équilibre qui se traduit par une contraction dont le résultat ne peut être qu'une diminution de la surface absorbante et du volume total de la cellule ; par conséquent un ralentissement de l'absorption de l'eau qui n'entraîne pas forcément un ralentissement de l'absorption des sels dont la diffusion peut être indépendante des mouvements du solvant. S'il s'agit d'électrolytes, comme c'est le cas le plus souvent, il est même possible que leur ionisation soit accrue et leur pénétration dans la cellule facilitée.

La contraction elle-même est probablement un phénomène osmotique, du moins en partie, et le stimulus électrique qui la détermine agit peut-être en modifiant la structure micellaire des colloïdes protoplasmiques.

De toute façon, l'action prolongée des décharges électriques de haute tension produit, sur les cellules végétales, un effet nuisible ; car les organes ainsi traités ne tardent pas à mourir. Ainsi les feuilles qui ont la propriété de noircir après leur mort présentent des parties noires dans la région comprise entre les points de contact des électrodes. Mais ce sont là des effets

secondaires qui ne se manifestent qu'après un certain temps, tandis que la contraction est immédiate et se traduit aussitôt par un ralentissement de la circulation de l'eau.

Sur ce point, les résultats que j'ai obtenus paraissent en contradiction avec ceux d'autres auteurs. P. LESAGE notamment a observé au contraire une accélération de la transpiration dans un champ électrique. Mais les conditions de ses expériences étaient très différentes. Les plants de *Pellia epiphylla* qui servaient à ses expériences étaient placés dans un champ continu entre deux plateaux dont l'un était muni de pointes, ce qui pouvait produire un vent électrique suffisant pour accélérer l'évaporation et ne devait déterminer dans la plante que des courants d'intensité très faible, ne dépassant pas le seuil de l'excitation nécessaire à déterminer la contraction.

C'est également le cas des expériences de GASSNER qui ont donné les mêmes résultats.

Par contre les courants de haute fréquence ne semblent déterminer aucune contraction et ne ralentissent que très peu la circulation de l'eau : le faible ralentissement que l'on peut observer est probablement dû aux oscillations parasites, de fréquence plus basse, qu'il est presque impossible d'éliminer complètement avec le dispositif dont je pouvais disposer. Dans quelques cas, l'action de ces courants paraît même accélératrice du courant d'absorption comme des échanges osmotiques.

Dans les diverses expériences d'électro-culture, les résultats trouvés par les auteurs sont souvent contradictoires : en ce qui concerne les courants continus, ces contradictions ont été expliquées par les recherches de KÖVESSI et de LAZERGES : ce dernier aboutissant à la notion très intéressante d'intensité optima pour la germination. Il est très probable que l'action des champs électrostatiques diffère de même suivant l'intensité du champ ; fonction du potentiel et de l'écart des électrodes, et qu'il existe, pour chaque cas particulier, une intensité optima pour laquelle le champ peut jouer le rôle de stimulant, sans que cette excitation détermine la contraction cellulaire, préjudiciable aux échanges nutritifs de la plante.

INDEX BIBLIOGRAPHIQUE

PREMIÈRE PARTIE

- BAUDOIN. — Sur l'Osmose électrique (*C. R. Acad. des Sciences*, 11 avril 1904).
- DASTRE (A.). — Osmose, Tonométrie, Cryoscopie (*Physique biologique de d'Arsonval*. Masson, éditeur).
- FOUARD (E.). — L'osmométrie des solutions salines et la théorie d'Arrhénius (*Journal de Physique théorique et appliquée*. Série 5, tome II, avril 1912).
- GIRARD (P.). — L'électrisation de contact en Biologie (*Rev. Générale des Sciences*, 30 août 1909).
- Sur les phénomènes d'Osmose en biologie (*Rev. Générale des Sciences*, 1^{er} avril 1911).
- HENRI (V.) et MAYER (A.). — L'état actuel de nos connaissances sur les colloïdes (*Rev. Générale des Sciences*, 30 nov., 15 déc. et 30 déc. 1904).
- MAFITANO (G.). — Les propriétés physiques des Colloïdes hydro-oxy-chloro-ferriques (*Rev. Générale des Sciences*, 15 août 1908).
- PERRIN (J.). — L'Osmose électrique (*Comptes Rendus Acad. des Sciences*, 8 et 11 juin, 5 et 12 octobre 1903).

DEUXIÈME PARTIE

- ESCARD (J.). — L'électricité et la végétation (*Rev. Gén. des Sciences*, 30 avril 1913).
- GASSNER. — Ueber Electrokultur (*Jahrbericht Gartenbaum*. Hamburg, 1911).
- GLÆDE. — Electrification à haute fréquence (*Rev. Gén. des Sciences*, 30 octobre 1911).
- HÄGGLUND. — *Biochemische Zeitschrift*, t. 70, 1915.
- Dr HEIM. — Electroculture par effluviation (*Bulletin officiel de la Direction des Recherches et Inventions*, n° 4, février 1920).
- KÖVESSI. — Influence de l'électricité à courant continu sur le développement des plantes (*C. R. Acad. des Sciences*, 29 janv. et 1^{er} juillet 1912).
- LAURENT (J.). — Les facteurs de la structure chez les végétaux (*Rev. gén. de Botanique*, 1907).
- LAZERGES (E.). — Influence des courants continus sur la germination (*Bull. Soc. Hist. Naturelle de Toulouse*, 1908).
- LECLERC DU SABLON (M.). — Sur les causes du dégagement et de la rétention de vapeur d'eau chez les plantes (*Rev. Génér. de Botanique*, t. XXV, 1913).

- Rôle de l'Osmose en biologie (*Biblioth. de Culture générale*. Flammarion, éditeur).
- LESAGE (P.). — Action du champ électrique sur la transpiration des plantes (*Bull. Soc. Scientifique et Médicale de l'Ouest*, t. XX, n° 4, 1^{er} déc. 1911).
- LEMSTRÖM. — *Electrokultur*. Berlin, 1912.
- PRIESTLEY. — Electricity in relation to horticulture (*Journal of Royal horticultural Society*. London, 1911).
- RAYBAUD. — L'osmose chez les Mucorinées (*Réunion biologique de Marseille*, 15 juin 1909).
- DE RUFZ DE LAVISON. — Nutrition minérale des plantes vasculaires (*Rev. Gén. Botanique*, t. XXIII, 1911).
- ZOLLA. — Revue annuelle d'Agronomie (*Revue Générale des Sciences*, 30 juillet 1909).
-

DEUXIÈME THÈSE

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ

Zoologie. — Conditions de la reproduction et sexualité chez les Phyllopodes.

Géologie. — Le Massif Armoricaïn.

VU ET APPROUVÉ :

Paris, le 27 mars 1930.

Le Doyen de la Faculté des Sciences.

CH. MAURAIN.

VU ET PERMIS D'IMPRIMER :

Le Recteur de l'Académie de Paris.

S. CHARLÉTY.

